

Antti Mäkinen

# Kuormitus- ja lämpenemäkokeen suunnittelu ja toteutus kestopagneettimoottorille

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Sähkövoimatekniikan koulutusohjelma  
Insinöörityö  
29.4.2011

Alkulause

Tämä työ tehtiin Oceanvolt Ltd:lle Helsingissä. Työssä tutkittiin kestopagneettimoottorin lämpenemistä eri kuormitustilanteissa. Työ oli erittäin haasteellinen ja monipuolinen.

Haluan kiittää työni ohjaajaa, dipl.ins. Richard Laxia avusta, neuvoista ja kärsivällisyydestä sekä suuresta avusta mittauksissa. Kiitos kuuluu myös työni valvojalle, dipl.ins. Jari Ijäkselle, joka auttoi ymmärtämään moottorin toimintaa ja momentin merkitystä siinä.

Helsingissä 29.4.2011

Antti Mäkinen

Tekijä(t) Otsikko  Sivumäärä Aika	Antti Mäkinen Kuormitus- ja lämpenemäkokeen suunnittelu ja toteutus kestomagneettimoottorille  66 sivua + 32 liitettä 29.4.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja(t)	DI Richard Lax Lehtori, DI Jari Ijäs
<p>Tässä insinöörityössä on selostettu propulsiokäyttöön suunnitellun kestomagneettimoottorin lämpenemäkoejärjestely. Alussa käytiin läpi lyhyesti propulsio- ja lämpenemäkokeiden merkitys ja kestomagneettien ominaisuuksia ja niiden viimeaikainen kehitys. Tämän jälkeen perehdyttiin eri moottorityyppien rakenteisiin ja ominaisuuksiin, erityisesti kestomagneettimoottorityyppiin. Varsinaisen teoriaosuuden lopuksi käsiteltiin momenttia ja ylikuormittamista moottorissa.</p> <p>Teoriaosuuden jälkeen kerrottiin Oceanvolt Ltd:stä ja sen e-propulsioon keskittyvästä hankkeesta. Tämän ohessa on pohdittu propulsiokäytössä esiintyviä moottorin käyttötapoja. Lopuksi on käyty läpi koelaitteisto, koejärjestelyt, kokeiden mittaustulokset ja niiden analysointi. Koelaitteiston käsittelyssä esiteltiin vielä lyhyesti niihin liittyvää teoriaa.</p> <p>Työn aikana tehtiin lämpenemäkokeita yhteen kestomagneettimoottoriseen moottoriin. Koneetta kuormitettiin eri tavoilla loppukäyttäjän oletettuja käyttötilanteita simuloiden. Tarkoituksena oli selvittää käyttötilanteisiin liittyviä rajoituksia, joiden tutkimisessa ilmeni muun muassa jäähdytysjärjestelmän liittyviä puutteita.</p>	
Avainsanat	kestomagneettimoottori, propulsio, momentti, lämpenemä

Author(s) Title  Number of Pages Date	Antti Mäkinen Load Test And Temperature Rise Test Planning And Execution For A Permanent Magnet Motor  66 pages + 32 appendices 29 April 2011
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Power Systems
Instructor(s)	Richard Lax Jari Ijäs, (Senior Lecturer)
<p>The purpose of this project is to describe the test arrangements for measuring temperature rise in a permanent magnet motor designed for propulsion use. The main aim was to identify restrictions regarding the use of permanent magnet motors.</p> <p>The study first briefly describes propulsion and permanent magnetic features and their recent development. After that the focus is on the structure and features of different motor types, especially permanent magnet motor types. The study also discusses torque in motors and overloading the motor.</p> <p>The theoretical part of this study is followed by an introduction of Oceanvolt Ltd and its project concerning electric propulsion. In addition, this part looks at the ways propulsion drives are used. Finally, this study reviews the test equipment, test arrangements, measurements, and their analysis.</p> <p>During the work, temperature rise testing was performed on a permanent magnet motor. The machine was loaded and overloaded in various ways by simulating actual usage. The tests proved that there was some deficiency in cooling system.</p>	
Keywords	permanent magnet motor, propulsion, torque, temperature rise



## Sisällys

Alkulause

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet, käsitteet ja symbolit

1	Johdanto	1
2	Tietoa propulsiosta	2
3	Yleistä kestopagneetista	5
4	Sähkömoottorin toiminta	6
5	Yleisimmät sähkömoottorityypit	8
5.1	Synkroni- eli tahtimoottori	9
5.2	Epätahti- eli oikosulkumoottori	9
5.3	Askelmoottori	9
5.4	Reluktanssimoottori	10
5.5	Kestopagneettitahtimoottori	11
5.5.1	Kestopagneettimoottorin edut	12
5.5.2	Kestopagneetin haitat	14
5.5.3	Aksiaali- ja radiaalivuokoneet	14
5.5.4	Käyttökohteita kestopagneettikoneille	16
6	Momentin riippuvuus sähköisistä suureista	17
7	Moottorin kuormitettavuus	21
7.1	Kuormitukseen liittyvä lämpöaikavakio	21
7.2	Moottorin ylikuormittaminen	23
8	Oceanvolt Ltd -yritys	25
8.1	Oceanvolt Ltd -yrityksen toiminta	25
8.2	Oceanvolt iBoats -hankkeessa	25
8.3	Oceanvolt ePropulsion -hankkeessa	26

8.4	Moottorivalintaan liittyviä perusteita	26
8.5	Esimerkki käyttökohteesta	27
9	Koestusjärjestelyt	28
9.1	Mittauksessa käytettävä koelaitteisto	28
9.1.1	CAN -väylä	29
9.1.2	Akusto ja latausjärjestelmä	30
9.1.3	Moottorinohjainyksikkö	31
9.1.4	Näyttö	33
9.1.5	Moottori	34
9.1.6	Jäähdytysjärjestelmä	36
9.1.7	Kuormakone ja sen ohjaus	38
9.1.8	Momenttianturi ja keskusyksikkö	38
9.2	Koestusmenetelmät	39
10	Koetulokset	41
10.1	Ensimmäisen puoliteholla suoritettun koestuksen esittely	41
10.2	Puoliteholla koestamisen toistaminen	45
10.3	Mittausmenetelmien tarkastelua ja kehittämistä	48
10.3.1	Virtausnopeuden tutkiminen	49
10.3.2	Lämmönluovutuskyvyn todentaminen käytännön kokeella	50
10.3.3	Lämpöanturin sijoittaminen moottorin ylälaippaan	52
10.4	Pumppaustehon merkityksen tarkastelua koestuksessa	52
10.5	Esilämmityksen testaus ja kuormitustehon noston vaikutusten tarkastelu	54
10.6	Kahden rinnakkaisen teholähteen mahdollistama pitkäkestoinen testaus	57
11	Yhteenveto	60
	Lähteet	64
	Liitteet	
	Liite 1. CAN -väylärasia	
	Liite 2. DC -teholähde	
	Liite 3. PM -moottorin runko	
	Liite 4. PM -moottorin roottori	
	Liite 5. PM -moottorin staattorikäämitys	
	Liite 6. PM -moottorin mekaaniset mitat	
	Liite 7. PM -moottorin teho- ja momenttikäyrät	
	Liite 8. PM -moottorin hyötysuhdekaavio	

Liite 9. PM -moottorin momenttikaavio

Liite 10. PM -moottorin laipan öljykanava

Liite 11. IEC -standardit 60034-6 ja 60034-1

Liite 12. KTY84 -anturien vastusarvotaulukko

Liite 13. PM -moottorin pumppu

Liite 14. PM -moottorin pumppu asennettuna

Liite 15. PM -moottorin vetolaite

Liite 16. Öljykanavan ilmausastia

Liite 17. Kuparinen lämmönluvuttaja

Liite 18. Kuormakone

Liite 19. Kuormakoneen ohjausyksikkö

Liite 20. Momenttianturin päätelaite

Liite 21. Momenttianturi sivusta

Liite 22. Momenttianturi akselinpäästä

Liite 23. Momenttianturin kytkinadapteri

Liite 24. Vedensekoittaja

Liite 25. Ulkoinen öljypumppu

Liite 26. 700 W:n lämpövastus

Liite 27. Laippa-anturi

Liite 28. Mittaustulokset 1.4.2011

Liite 29. Tuloksista lasketut arvot 1.4.2011

Liite 30. Mittaustulokset 6.4.2011

Liite 31. Mittaustulokset 8.4.2011

Liite 32. Lopulliset testijärjestelyt

## Lyhenteet

ABS	Antilock Braking System. Lukkiutumaton jarrutusjärjestelmä.
ACIM	AC Induction Motor. Vaihtosähköllä toimiva induktiomoottori.
AlNiCo	Alumiini-nikkeli-koboltti-yhdiste.
CAN	Controller Area Network. Erityisesti autoissa käytetty tiedonsiirtoväylä.
e-propulsion	electric propulsion. Sähköinen propulsio.
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung. Yritys, jolla on rajallinen vastuu.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, hilaeristeinen bipolaaritransistori
LCD	Liquid Crystal Display. Nestekidenäyttö.
NdFeB	Neodyymi-rauta-boori-yhdiste.
PM	Permanent Magnet. Kestomagneetti.
POD	Podded Drive. Kapseloitu vetolaite, joka on aluksen rungon ulkopuolella.
SmCo	Samarium-koboltti-yhdiste.
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage. Suprajohtava magneettinen energiavarasto.
SMJ	sähkömagneettinen jännite
SR	Switched Reluctance motor. Reluktanssimoottori.

## Käsitteet

A	ampeeri
Ah	ampeiritunti
A	pinta-ala
C	Celcius
C	moottorivakio
C	varaus
$C_{akku}$	akun varaustila
$d$	halkaisija
E	energia
f	taajuus
h	lämmönsiirtokerroin
$h_{alumiini}$	alumiinin lämmönsiirtokerroin
$h_{kupari}$	kuparin lämmönsiirtokerroin
I	virta
$I_a$	kuormitusvirta
$I_{an}$	nimelliskuormitusvirta
$I_m$	magnetointivirta
$I_{mn}$	nimellismagnetointivirta
$I_n$	nimellisvirta
K	Kelvin
km	kilometri
$\text{kJ/m}^3$	kilojoulea per kuutiometri
kW	kilowatti
kWh	kilowattitunti
l	pituus
l/min	litraa minuutissa
m	metri
M	momentti
$M_n$	nimellismomentti

$m_{potk}$	potkurin momentti
$m^2$	neliometri
N	Newton
N	pohjoisnapa
$n$	kierrosnopeus
Nm	Newtonmetri
$n_{moot}$	moottorin kierrosluku
$n_{potk}$	potkurin kierrosluku
$n_n$	nimelliskierrosnopeus
$P$	teho
$P_a$	antoteho
$P_h$	häviöteho
$p_{in}$	kokonaisteho
$P_n$	nimellisteho
$p_{potk}$	akseliteho
$R_{moot}$	moottorin käämin lämpötila
rpm	kierrosta minuutissa
S	etelänapa
$t$	aika
$T$	momentti
$T_l$	moottorin ylälaipan lämpötila
$T_{moot}$	moottorin käämin lämpötila
$T_s$	säätimen lämpötila
$T_v$	veden lämpötila
$T_{öljy}$	vedestä lämpövastukselle siirtyvän öljyn lämpötila
$T_{öm}$	vedestä moottorille siirtyvän öljyn lämpötila
$T_{öv}$	moottorilta veteen siirtyvän öljyn lämpötila
$U$	jännite
$U_n$	nimellisjännite
$V$	tilavuus
V	voltti
$v$	virtausnopeus
W	watti
Wh/kg	Wattituntia per kilogramma
W/kg	Wattia per kilogramma

## Symbolit

$\Delta\theta$	lämpenemän muutos
$\eta$	hyötysuhde
$\theta$	lämpenemä
$\theta_{max}$	maksimilämpenemä
$\theta_u$	ympäristön lämpötila
$\pi$	pii
$\tau$	aikavakio
$\phi$	magneettivuo
$\Omega$	ohmi
$\omega$	kulmanopeus

## 1 Johdanto

Kestomagneettimootoreiden käyttö on yleistynyt viime aikoina magneettien ja moottorinohjausjärjestelmien kehittymisen myötä. Niiden käyttö perinteisempien moottorityyppien tilalla säästää energiaa. Energiansäästö on yleisesti tunnustettu merkittäväksi keinoksi ilmastonmuutoksen hillitsemisessä.

Jos polttomoottorit korvataan kestopagneettimoottorilla, se tuo mukanaan muitakin etuja energiansäästön lisäksi. Se vähentää starttiongelmia, käyttö- ja materiaalikustannuksia sekä meluhaittoja.

Oceanvolt Ltd on suomalainen kestopagneettikoneita purjevereiden voimanlähteeksi kehittävä pienyritys. Sen tavoitteena on kehitellä ratkaisu, jolla perinteiset polttomoottorit voidaan korvata sähkömoottoreilla tai poltto- ja sähkökoneiden hybridikäytöllä.

Hybridikäyttö tuo mukanaan pitemmän toimintasäteen ilman, että tarvitaan suurempaa akkukapasiteettia. Se tosin asettaa lisävaatimuksia laitteistolle. Se myös kasvattaa investointikustannuksia.

Tässä insinöörityössä perehdytään kestopagneettikoneeseen ja sen toiminnan ymmärtämiseen liittyvään taustatietoon. Lisäksi työssä tutkitaan PMS 154W-kestopagneettikoneen lämpenemistä erilaisissa kuormitustilanteissa pelkkää sähkökäyttöä ajatellen.

Testitulosten perusteella pyritään löytämään moottorin käyttöön liittyviä rajoituksia. Niiden avulla pohditaan myös jatkotestaamisen tarpeellisuutta ja siihen liittyviä parannusehdotuksia.

## 2 Tietoa propulsiosta

Propulsion tarkoituksena on saada kulkuneuvolle työntövoima siirtämällä ilmaa tai vettä kulkusuunnan vastaiseen suuntaan. Propulsio tarkoittaa potkurien pyörittämistä moottorilla. Sähköinen propulsio vastaavasti niiden pyörittämistä erityisesti sähkömoottorilla. Sähkö- eli e-propulsiokäyttö sisältää moottorinohjauksen eli taajuusmuuttajat, niitä syöttävät muuntajat, taajuusmuuttajien säätöjärjestelmän sekä potkurimoottorit. [1; 2, s. 20.]



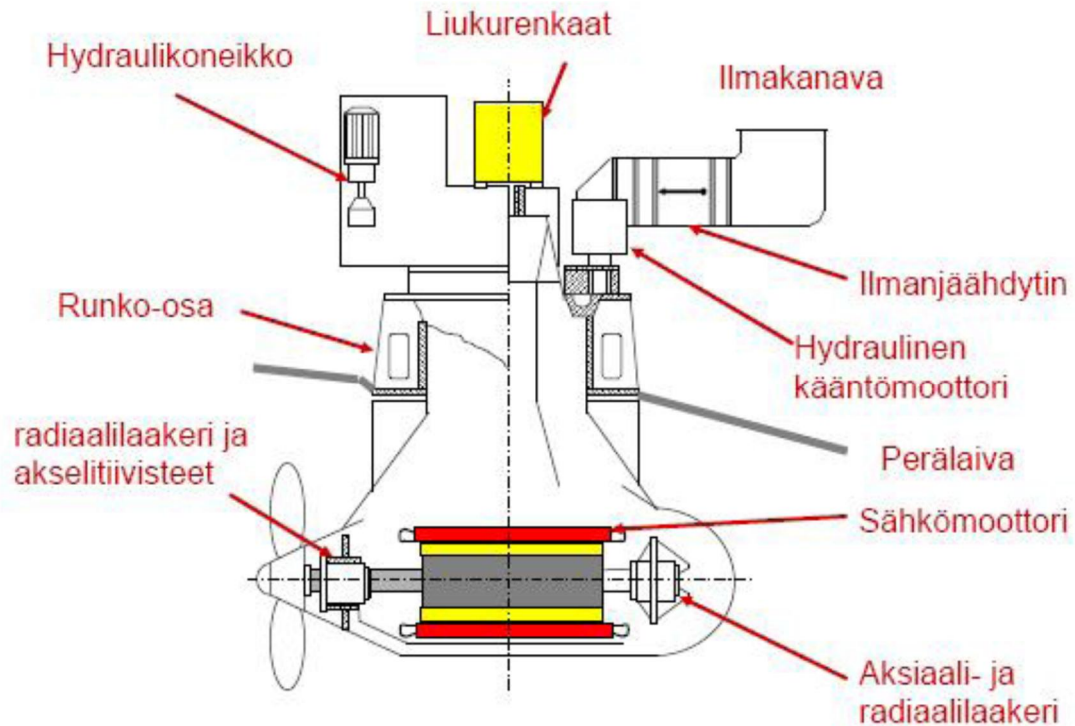
Kuva 1. Propulsiojärjestelmän rakenne [3]

Pienemmissä käyttökohteissa voidaan sähkö ottaa akustosta, joka ladataan propulsiokoneen toimiessa generaattorina silloin, kun aluksella ei ole tarvetta kiirehtiä. Vaihtoehtoisesti lataus voidaan suorittaa satamassa suoraan sähköverkosta. [4.]

Sähköpropulsiota käyttävässä laivassa on yleensä generaattoreita tuottamassa sähkömoottorien tarvitseman sähköä. Generaattoreita voidaan pyörittää esimerkiksi dieselmoottorilla tai kaasuturbiinilla tai suuremmissa aluksissa jopa ydinenergialla. Jälkimmäistä käytetään sotilaskäytössä, sukellusveneissä ja lentotukialuksissa.

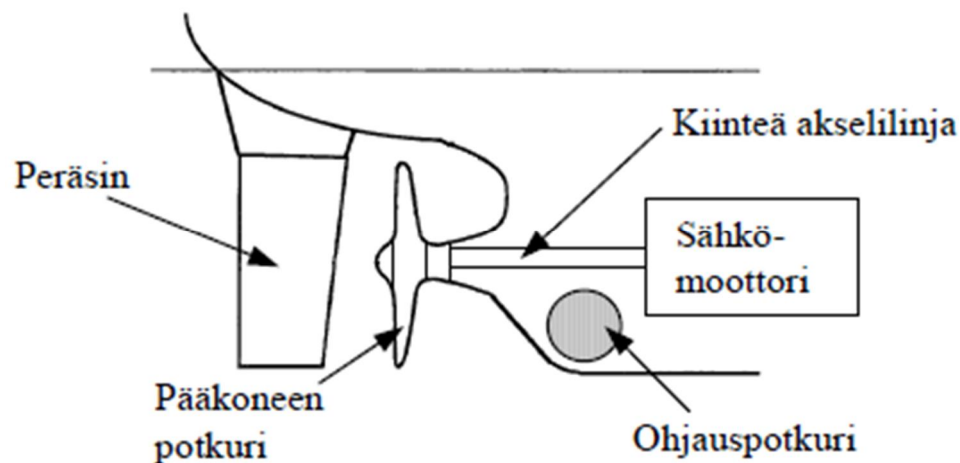
E-propulsiota käytetään erityisesti aluksissa, joissa propulsiotehon ja aluksen muun sähkötehon huiput eivät osu samalle hetkelle. Sitä suositaan myös kohteissa, joissa tarvitaan suurta vääntömomenttia. Tästä on esimerkkeinä jäänmurtaajat ja hinaajat. Propulsiokäytössä on erilaisia potkurijärjestelmiä

POD- eli ruoripotkuria käyttävässä järjestelmässä moottori ja potkuri sijaitsevat laivan rungon ulkopuolella ja ovat käännettävissä. Tämä on eduksi aluksen ohjattavuudelle. [2, s. 20 - 22.] Lisäksi ohjauksessa voidaan hyödyntää veden virtausta, joka parantaa kokonaishyötysuhdetta [5].



Kuva 2. Ruoripotkurin rakenne [2, s. 22]

Ruoripotkurissa sähkömoottori on kuvan 2 mukaisesti laivan pohjan (kuvassa Perälavaksi nimetty harmaa vinoviiva) alapuolella vedessä, omassa kotelossaan. Ruoripotkuri on usein käännettävissä ohjauksen tehostamiseksi.



Kuva 3. Perinteisen potkurityypin malli [6]



Kuvasta 3 (ks. s. 3) nähdään, miten perinteisessä potkurityypissä moottori on sijoitettu laivan rungon sisälle. Tätä kutsutaankin sisämoottoriksi. Voima siirretään potkurille kapean akselin avulla.

Laivan liikkeen nopeuden säätelyyn on useita tapoja. Potkurin lapakulmaa voidaan säädellä tai muuttaa moottorin kierrosnopeutta. Säädotapa riippuu muun muassa moottorityypistä.

Purjeveneissä käytetään tyypillisesti Diesel-moottoria, jossa voimansiirto tapahtuu akselilla, tai purjeveneen vetolaitteella (ks. kuva 4). Molempia kutsutaan sisämoottoreiksi. Pienimmissä purjeveneissä käytetään perämoottoriksikin kutsuttua ulkolaitamoottoria. Muita yleisimpiä vetolaitteita on sisäperä- ja POD- tyyppiset vetolaitteet.



*Kuva 4. Sisämoottori, jossa voimansiirto tapahtuu vetolaitteella [7]*

Sähköpropulsio on suuressa mittakaavassa alkanut vasta viime vuosina lähinnä akkuteknologian kehittymisen ja akkujen hintojen tippumisen myötä. Aiemmin akkujen energiatiheys ei riittänyt tarpeeksi kevyisiin ratkaisuihin, joilla olisi saavutettu järkevä toimintasäde veneille. Sähköpropulsio on kuitenkin ollut käytössä esimerkiksi eri puolilla Keski-Eurooppaa, jossa polttomoottorit ovat olleet kiellettyjä eräissä järvissä. [7.]

### 3 Yleistä kestopagneetista

Sähkömoottorin toiminnan perusedellytys on siinä vaikuttava magneettikenttä. Tässä työssä tutkittavan moottorityypin erityisominaisuus liittyy nimenomaan kestopagneetin käyttöön magneettikentän tuottamisessa.

Magneetti on kappale, joka luo ympärilleen magneettikentän. Magneetti voi olla joko sähkömagneetti tai kestopagneetti. Sähkömagneetti luodaan johtamalla sähkövirta käämityn johtimen läpi. Sen voimakkuus riippuu virran suuruudesta ja suunta virran suunnasta. Sähkömagneetin vaikutusta voidaan tehostaa tuomalla sen läheisyyteen ferromagneettisia aineita, joita pitkin magneettikenttä johtaa hyvin. [8, s. 2; 9.]

Magneetissa on aina vähintään kaksi napaa, pohjoisnapa N ja etelänapa S. Ensimmäinen tunnettu kestopagneetin sovellus oli kompassi. Rautaneula tehtiin magneettiseksi koskettamalla sitä ulkoisella magneettisella materiaalilla. [10, s. 2.]

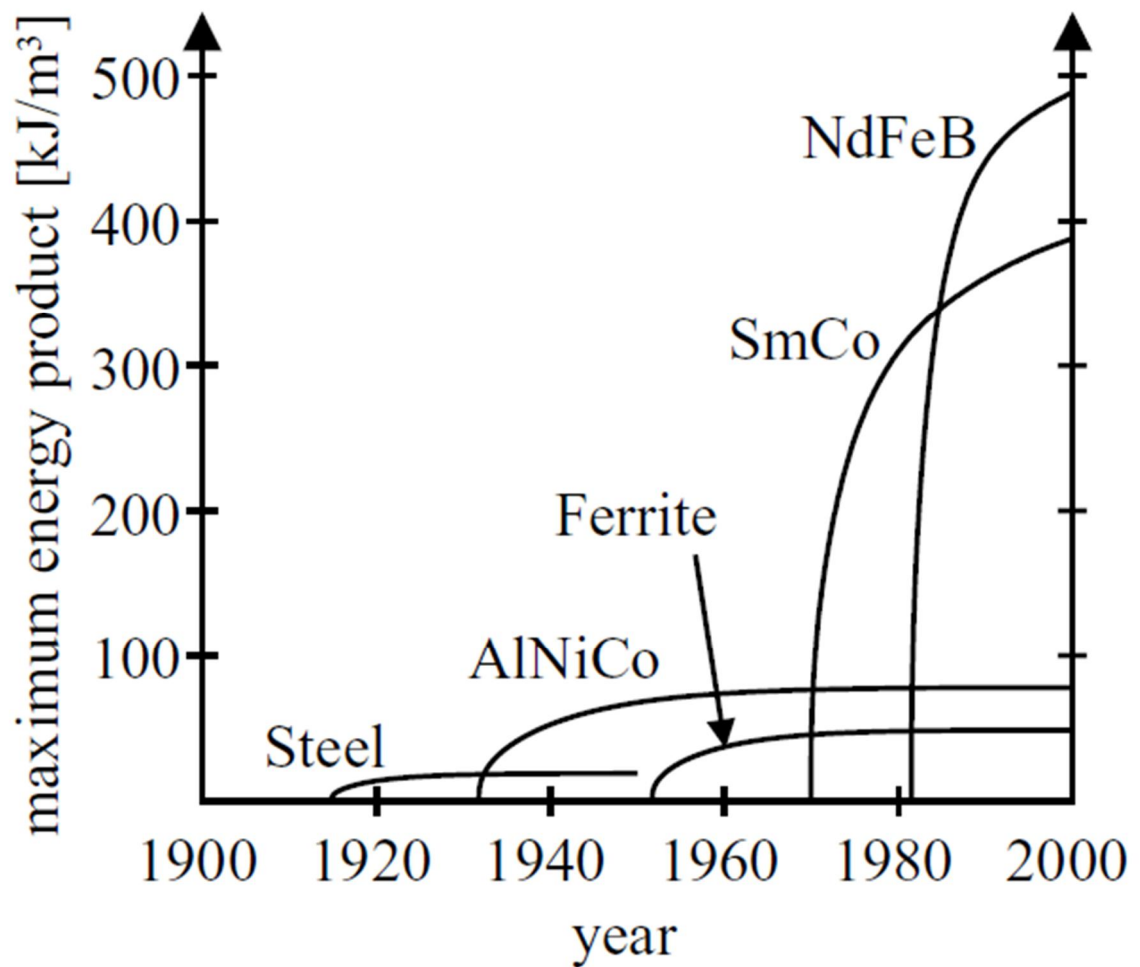
Kestopagneetit jaetaan kolmeen tyyppiin niiden magneettisten ominaisuuksiensa perusteella. Diamagneettiset aineet johtavat magneettikenttää heikommin, kuin ainetta ympäröivä ilma. Näitä ovat muun muassa kupari, hopea ja vesi. Paramagneettiset aineet ovat sellaisia, jotka reagoivat ulkoiseen magneettikenttään voimakkaasti. Ferromagneetit ovat aineita, jotka magnetoituvat hyvin voimakkaasti. Ferromagneetit menettävät korkean magneettisuutensa kullekin aineelle yksilöllisessä Curie-lämpötilassa. [8, s. 3.]

Ferromagneettinen aine ei välttämättä vaikuta ulospäin magneettiselta. Kun se viedään ulkoiseen magneettikenttään, se muuttuu itsekin magneettiseksi. Magneettikenttä säilyy vielä senkin jälkeen, kun aine viedään pois ulkoisesta magneettikentästä. Esimerkki tällaisesta ferromagneettisesta aineesta on rauta. [9.]

Kuvasta 5 (ks. seur. s.) voidaan havaita, että 1900-luvun alusta alkanut kehitys on kiihtynyt 2000-lukua kohti. Samalla, kun jo tunnettujen aineiden energiantuotantoa on pystytty kehittämään, on löydetty uusia ferromagneettisia yhdisteitä.

Ferriitin löytäminen 1950-luvulla oli suuri askel, koska se oli halvempaa, kuin siihen

asti tunnetut ferromagneettiset aineet. Sitä on käytössä nykypäivänkin sovelluksissa, esim. kaiuttimissa ja virtalähteiden häiriöpoistossa.



Kuva 5. Kestomagneettimagneettien kehitys 1900-luvulla [11, s. 7]; pystyakselilla on kunkin aineen maksimi-energiantuotanto [kJ/m<sup>3</sup>]

Nykyään merkittävimpiä ferromagneettisia aineita ovat SmCo ja NdFeB. Vaikka NdFeB omaa suuremman energiatiheyden kuin SmCo ja on halvempi, on sillä kuitenkin huonompi lämpötilastabiilius ja alhaisempi Curie-lämpötila. NdFeB on myös herkempi korroosiolle. [10, s. 2 - 3.]

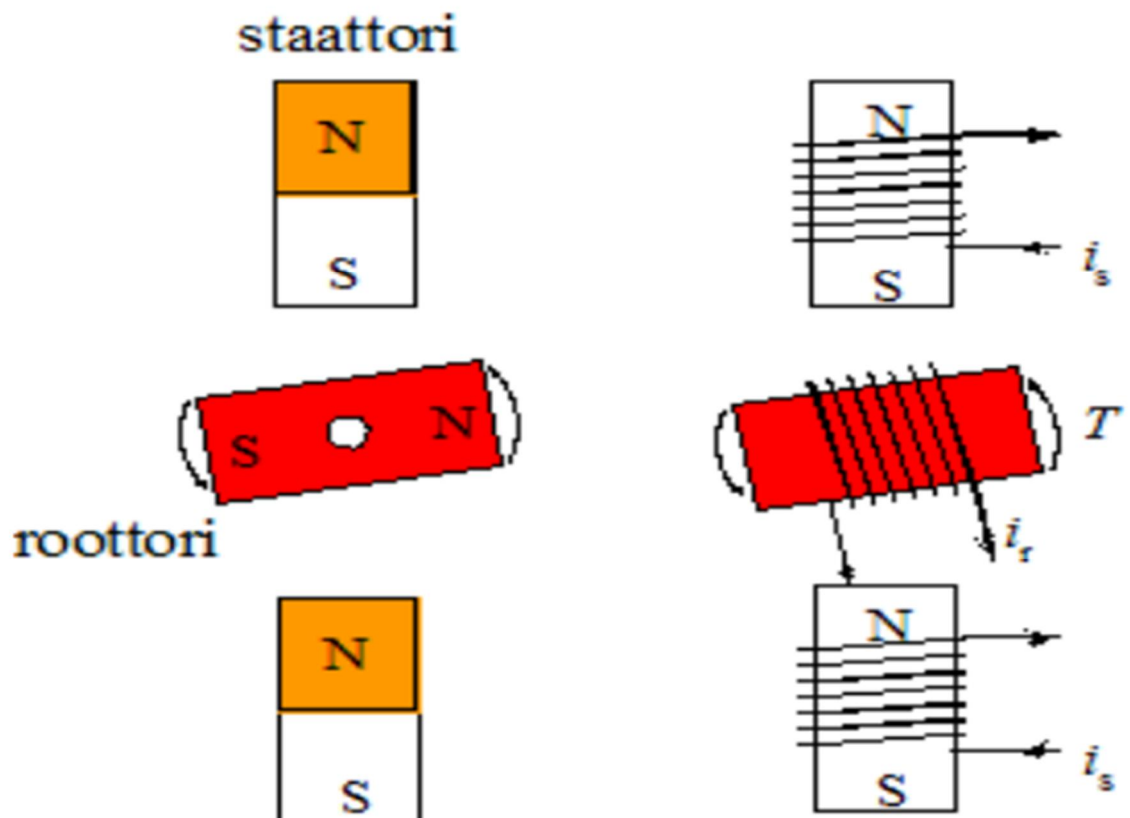
#### 4 Sähkömoottorin toiminta

Sähköpropulsio on aluksen liikuttamista sähkömoottorin avulla. Sähkömoottorityyppejä on useita erilaisia. Jokaisella moottorityypillä on omia erityispiirteitä, mutta perusidea on kaikissa sama.

Sähkömoottorin tehtävänä on muuttaa sähköenergia mekaaniseksi energiaksi. Moottorit sisältävät aina vähintään seuraavat komponentit: roottori eli pyörijä akseleineen, staattori eli seisoja, laakeripukit ja laakerit.

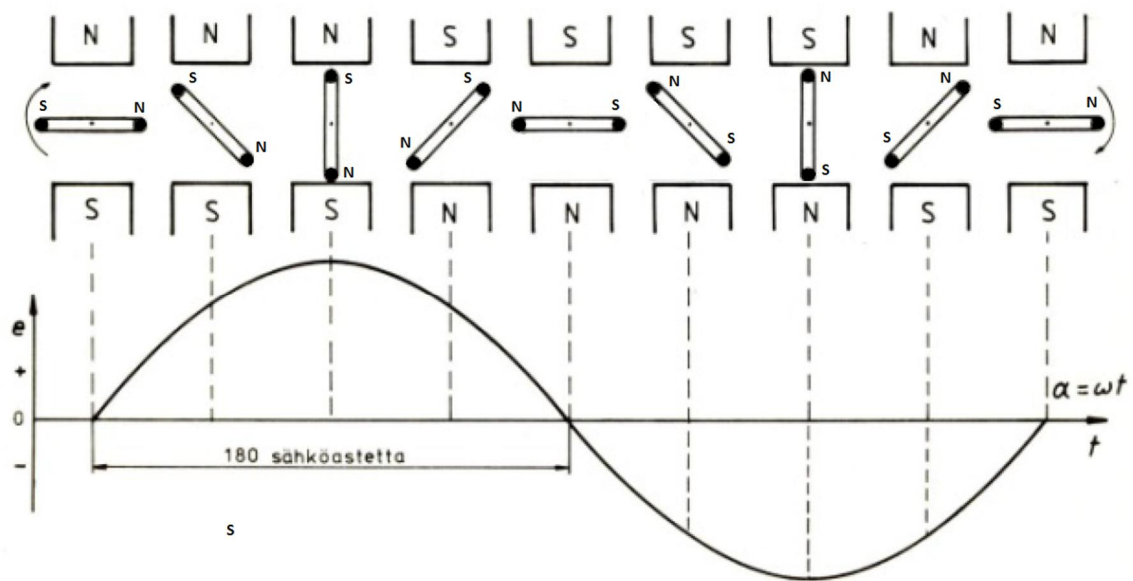
Laakerit on kiinnitettynä laakeripukeille ja ne kannattelevat roottoria. Laakeripukit ovat kiinni staattorissa, joka on koneen runko. Laakereiden ansiosta roottorin ja staattorin välissä on ilmarako, jonka ansiosta roottori pääsee pyörimään mahdollisimman vapaasti. [12, s. 1.]

Sekä staattori että roottori sisältävät magneetteja, kukin tasaisella etäisyydellä toisistaan. Magneetit ovat joko kestopagneetteja, tai sähkömagneetteja. Roottorin pyörintä perustuu sähkömagneettien hallittuun ohjaamiseen; niiden suuntaa ja voimakkuutta säädellään sähkövirralla. Moottorin käyttämä sähköteho siirretään magneettikentän välityksellä roottoriin mekaaniseksi tehoksi ja lämpöhäviöiksi. (Ks. kuva 6, pelkistetty sähkömoottori.)



Kuva 6. Sähkömoottorin periaatekuva; oikealla on kuvattu sähkömagneeteista ja vasemmalla vastaava kestopagneeteista tehty moottori [13]

Staattorin sähkömagneetteja ohjataan esimerkiksi sinimuotoisella vaihtovirralla ja roottoria tasavirralla. Tällöin roottorin kestopagneetti liikkuu staattorin sähkömagneettien napaisuuden vaihtuessa. Puolen aallonpituuden välein staattorin napaisuus vaihtuu ja roottori jatkaa pyörintäänsä. Sen pohjoisnapa saavuttaa staattorin etelänavan taas seuraavan puolikkaan aallonpituuden aikana, jonka jälkeen staattorin napaisuus taas vaihtuu. Näin ollen lähekkäin päässeet navat ovatkin nyt samanmerkkiset ja alkavat hylkiä toisiaan. Periaatekuvassa (ks. kuva 7) esitetään äskeinen tapahtuma 45 sähköasteen välisissä otteissa.



Kuva 7. Periaatekuva roottorin asennosta siniaallon eri vaiheissa

Kuvassa 7 on havainnollistettu kaksinapaisen kestopagneettikoneen roottorin asento yhden sähköisen jakson eri hetkinä. Moottoreissa on yleensä myös useita käämejä vakauttamassa pyörintää ja kompensoimassa siihen liittyviä värinöitä.

## 5 Yleisimmät sähkömoottorityypit

Sähkömoottorityyppejä on lukuisia erilaisia. Kullakin on omat erityispiirteensä, hyötynsä, haittansa sekä käyttökohteensa. Erilaisia sähkömoottorityyppejä on lukuisia ja yksittäiset moottorityypitkin voidaan jakaa erilaisiin alakategorioihin. Jako voidaan tehdä niiden rakenteen perusteella. Jakoperusteita ovat moottorin avo- tai umpinapaisuus, teholuokka tai roottorin sijainti koneessa.

### 5.1 Synkroni- eli tahtimoottori

Tahtimoottorin erityisominaisuus on verkkotaajuuden suuruinen pyörimisnopeus. Sen etuina ovat suurien teholuokkien saavuttaminen ja suuri vääntömomentti [14]. Lisäksi magnetoinnin avulla voidaan hallita syöttävän verkon loistehon määrää.

Tahtimoottorin haittapuolena ovat suuret mekaaniset mitat, siitä johtuva suuri massa ja kierrosluvun riippuvuus verkkotaajuudesta. Haittana on myös ulkoisen magnetoinnin tarve. Pyörivään roottoriin on siis syötettävä sähköä. Tämä on yleensä toteutettu harjoilla, jotka ovat mekaanisesti rasittuva osa. On myös olemassa keinoja harjattomaan magnetointiin, mutta niiden monimutkaisuuden vuoksi koneesta tulee kalliimpi. [15, s. 22.]

### 5.2 Epätahti- eli oikosulkumoottori

Epätahtimoottori on yleisimmin teollisuudessa käytetty moottorityyppi. Tämän vuoksi sitä on valmistettu paljon sarjatuotantona ja sitä valmistetaan vakioarvoilla erilaisiin käyttöihin.

Induktiomoottoriksikin kutsutun epätahtimoottorin pyörimisnopeus määräytyy napaluvun perusteella. Pyörimisnopeuden säädön on mahdollistanut viime aikoina paljon kehitetty taajuusmuuttaja. Epätahtikoneen ongelmaksi muodostuu hitaammilla käytöillä ja nimellistä pienemmillä kuormilla huononeva hyötysuhde. [13.]

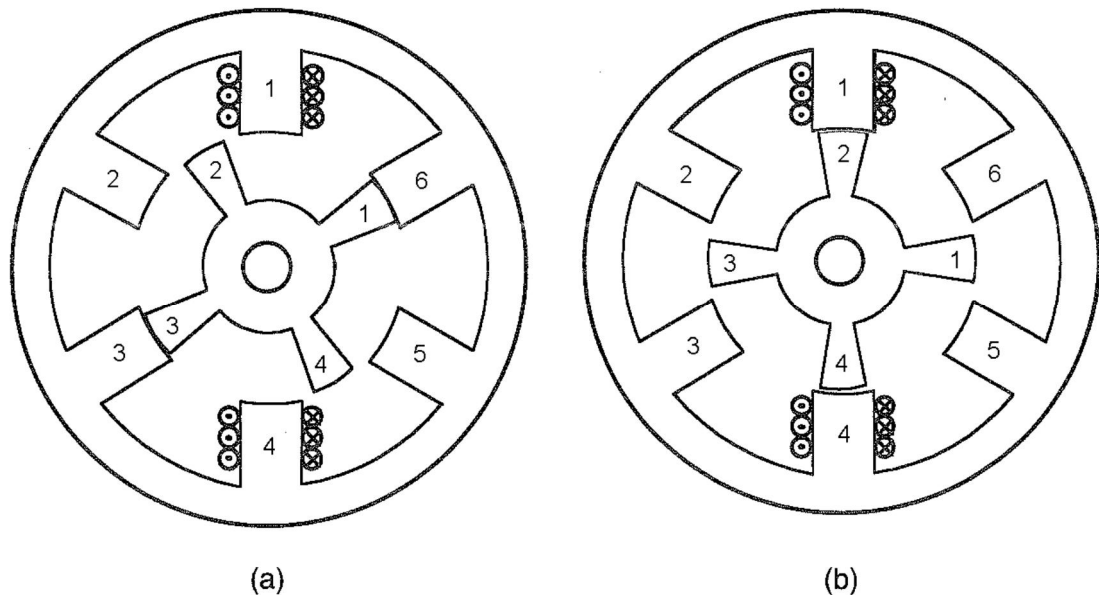
### 5.3 Askelmoottori

Askelmoottori toimii tasasähköllä. Askelmoottorin ohjaamiseen tarvitaan aina erillinen ohjauspiiri. Sen pyörintä on jaettu nimensä mukaisesti useisiin askeliin, eli se ei ole lineaarista. Etuna on se, että ohjauspulssien määrän perusteella tiedetään tarkalleen, missä asennossa moottorin akseli kulloinkin on. Muilla moottoreilla tähän tietoon vaaditaan erillinen säätöjärjestelmä. Askelmoottoria voidaan myös helposti ohjata digitaalisesti; yksi pulssi vastaa yhtä askelta ja tietty pulssimäärä vastaa näin ollen tiettyä pyörähdyskulmaa. [12.]

Momentin kasvaessa riittävän suureksi, moottori jättää askelia väliin, jolloin se menettää akselitietonsa. Tästä syystä askelmoottori ei sovellu suuria vääntömomentteja vaativiin käyttöihin, vaan ennemminkin pieniin kohteisiin. Askelmoottori onkin vakiinnuttanut asemansa erityisesti elektroniikkateollisuudessa. [16.]

#### 5.4 Reluktanssimoottori

Reluktanssimoottori eli SR -moottori on yksinkertainen rakenteeltaan eikä sisällä roottorikäämitystä. Tästä johtuen se on varmatoiminen, kevyt ja omaa hyvän hyötysuhteen. Lisäksi se kykenee toimimaan suurilla kierrosluvuilla. Roottori on tyypillisesti rakennettu kevyestä ferromagneettisesta materiaalista ja pyörrevirtojen vähentämiseksi se on laminoitu.



Kuva 8. Reluktanssimoottorin läpileikkaus kahdessa eri tilassa [17, s. 4]

Reluktanssimoottorin toimintaa havainnollistetaan kuvan 8 avulla. Staattorin navat 1 ja 4, 2 ja 5 sekä 3 ja 6 muodostavat kukin yhden vaiheen. Kohdassa a) roottori on paikallaan ja sen navat 1 ja 3 ovat kohdakkain vaiheen 3 - 6 kanssa. Kun 1 - 4 vaiheen käämiin syötetään virta, muodostuu sen napojen välille magneettivuo. Tämä vuo kulkee sieltä, mistä sen on helpoin kulkea eli tässä tapauksessa navalta 1 ilman kautta roottorin navalle 2 ja siitä suoraan roottorin navalle 4. Siitä vuo jatkaa ilman kautta staattorin napaan 4.

Staattorin, roottorin ja näiden välisen ilmvälän muodostama magneettipiiri pyrkii luonnostaan tilaan, jossa niiden reluktanssi on pienimmillään. Koska roottori on valittu materiaalina sellaiseksi, että sen reluktanssi on pienempi kuin ilman, pyörittää roottorin navat 2 ja 4 staattorin napoja 1 ja 4 vasten kohdan b) mukaisesti. Tämän jälkeen virta katkaistaan navoilta 1 - 4 ja syötetään navoille 2 - 5, ja roottori jatkaa pyörimistään saman mallin mukaan. [17, s. 4.]

Reluktanssimoottori olisi pienen ja kevyen rakenteensa puolesta hyvä valinta e-propulsiokäyttöön pienissä aluksissa. Sen haittapuolena on generaattorina toimimisen vaikea toteuttaminen, sillä reluktanssimoottorissa ei ole kestopagneettia eikä magnetointikämiä roottorin puolella. Näin ollen roottoriin ei synny magnetointia pelkän akselin pyörimisen johdosta eikä staattoripuolelle liioin jännitettä.

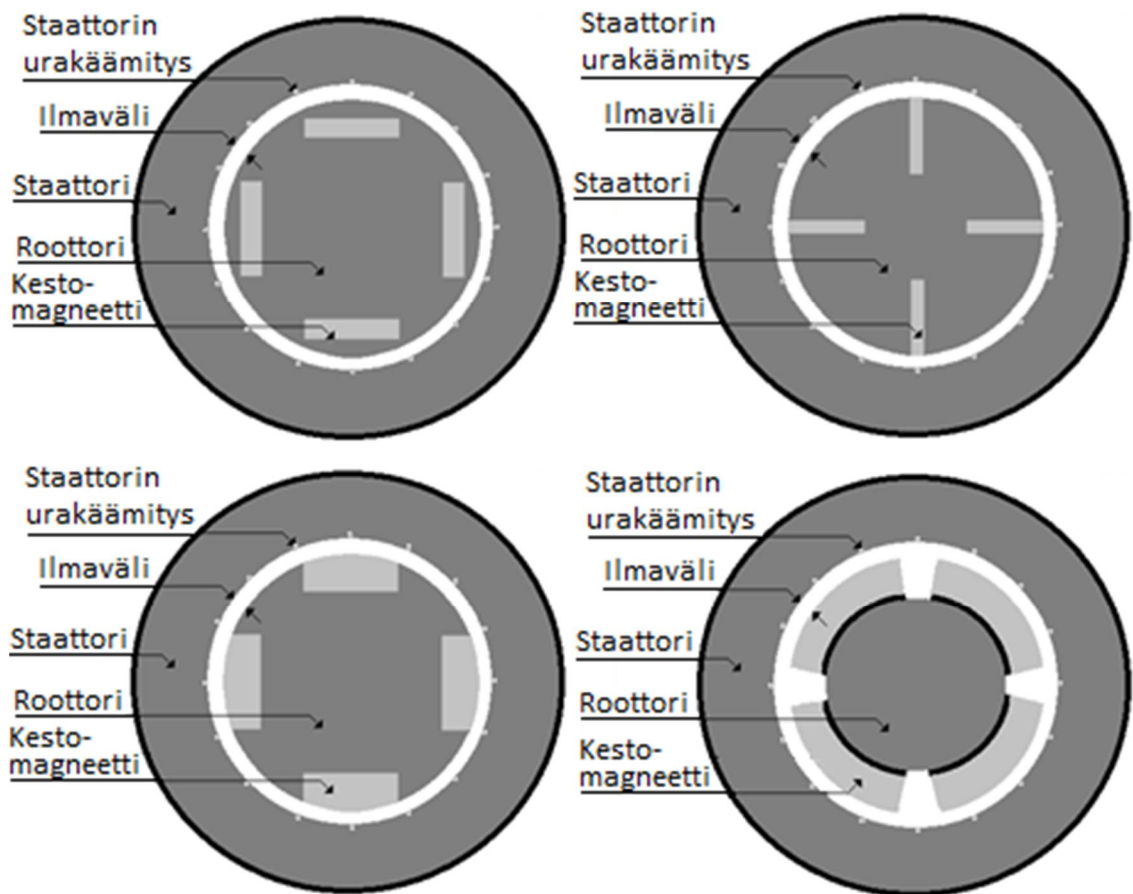
## 5.5 Kestomagneettitahtimoottori

Michael Faraday kehitti ensimmäisen kestopagneettimoottorin vuonna 1821 (Faradayn levy). Niiden kehitys on ollut ongelmallista tehokkaiden kestopagneettien puuttumisen vuoksi. Kestomagneettien raju kehitys alkoi 1960-luvulla, mutta vasta 1990-luvulla suurempien kestopagneettikoneiden kehitys on päässyt kunnolla käyntiin. Moottorinohjauksen, eli kestopagneettikoneissa taajuusmuuttajan kehittymisen myötä kestopagneettimoottoreiden pyörimisnopeuden muutoksen vasteaika sekä momenttivasteen vakaus ovat parantuneet merkittävästi. [9, s. 1; 18; 19, s. 2.]

Kestomagneettimoottorit jaetaan pintamagneetti- ja sisämagneettimoottoreihin, joiden periaatepiirroksia on kuvassa 9 (ks. s. 12). Pintamagneettimoottorissa magneetit ovat roottorin pinnassa. Näiden koneiden kierrosnopeus on rajallinen, koska suurilla nopeuksilla kasvava keskipakoisvoima pyrkii irrottamaan magneetit liitoksistaan. Ongelmaan on kehitelty erilaisia ratkaisuja, kuten niiden vyöttäminen roottoriin metallivyöllä. (Ks. kuva 9, pinta- ja sisämagneettityyppejä.)

Sisämagneettimoottoreissa magneetit ovat roottorin sisällä. Irtoamisongelmaa ei ole, mutta välimatka staattorikäimitykseen kasvaa. Välimatkan kasvaminen heikentää magnetoinnin vaikutusta ja näin ollen myös moottorin ominaisuuksia. [8, s. 14.]





Kuva 9. Pintamagneettimoottori (oikealla alhaalla) ja joitakin sisämagneettimoottorityyppejä

Koska roottorin magneettikenttä on vakio, kestopagneettitahtimoottori optimoidaan tiettyyn toimintapisteeseen ja sen nopeutta hallitaan taajuusmuuttajalla. Toimintapisteen ulkopuolella hyötysuhde heikkenee. [20.]

### 5.5.1 Kestomagneettimoottorin edut

Kestomagneettikoneella on useita etuja magnetointikäämejä käyttäviin koneisiin verrattuna. Kestomagneettikoneen hyötysuhde ei huonone ulkoisen magnetoinnin takia osakuormilla. Tämä johtuu siitä, että sisäinen magneetti tuottaa aina itse magnetointitehonsa.

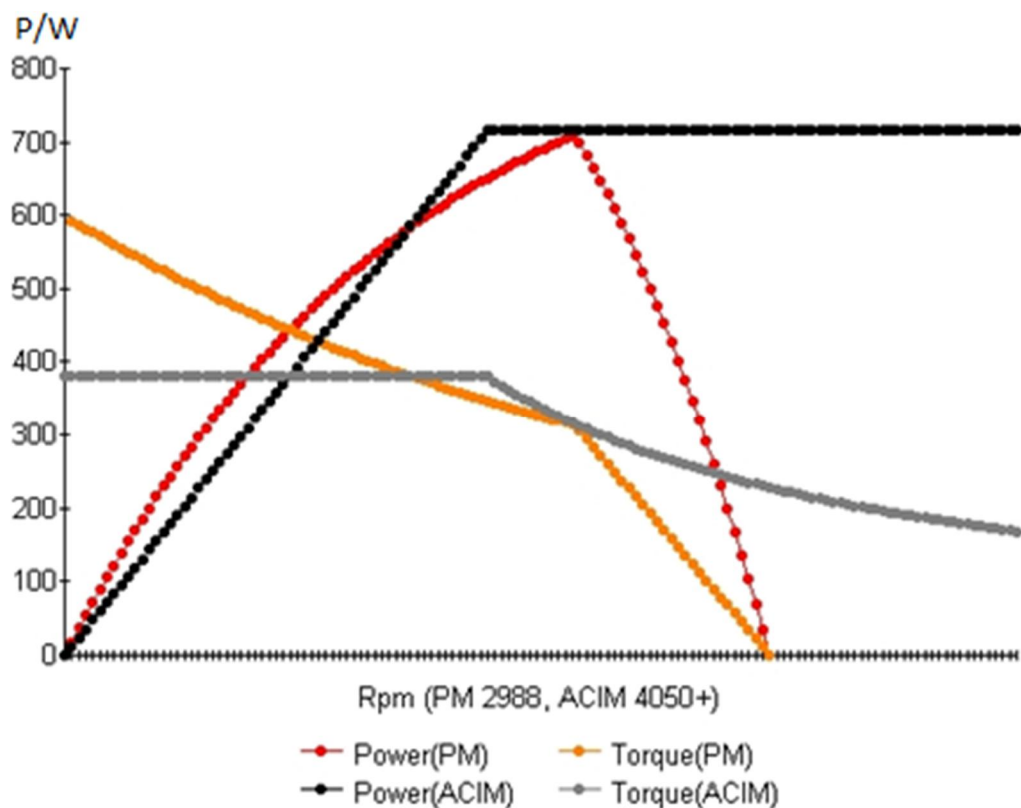
Muissa koneissa ulkoinen magnetointiteho suhteessa kuorman vaatimaan tehoon kasvaa osakuormilla. Tästä on kestopagneettikoneelle myös epäsuoria etuja muihin koneityyppeihin nähden. Koska kestopagneettikoneessa ei kulje magnetointivirtaa, ei magnetoinnin vuoksi tarvitse huolehtia jäähdytyksestäkään. Magnetointikäämityksen vaihtuessa kevyempään kestopagneettiin, pienenee myös hitausmomentti ja sitä kautta

vastamomentin muutostilanteissa syntyvä vasteaika. Hitausmomentin pienentyessä vähenee myös kiihdytyksessä aiheutuvat häviöt. [19, s. 1.]

Kestomagneettikoneita voidaan käyttää niin sanottuna suorakäyttönä, jossa moottori on kytkettynä suoraan työkoneeseen ilman vaihdetta. Näin säästetään tilaa, huollon tarvetta ja päästään eroon vaihteiston lisäämistä mekaanisista välyksistä ja joustoista. [10, s. 6.]

Kestomagneettikoneen tuoma etu tähänastiseen teollisuuden työjuhtaan, epätahtikoneeseen nähden, on kokonaan uusi nopeusalue. Aikaisemmin käyntinopeudet ovat alkaneet 700 - 800 kierroksesta minuutissa. Sen alapuolella hyötysuhde on ollut kohtuuttoman pieni. Kestomagneettitahtikoneessa kierrosnopeus voi hyvinkin olla 100 - 700 kierrosta minuutissa. Lisäksi tuulivoimaan erityisesti suunnitelluissa kestomagneettitahtikonetyypeissä on mahdollista käyttää jopa 20 kierroksen pyörimisnopeutta. [21.]

Vääntömomentin osalta kestomagneettimoottori yhdistää epätahti- ja tahtimoottorin parhaat puolet:



Kuva 10. Epätahtikoneen (ACIM) ja kestomagneettikoneen (PM) teho- ja momenttikäyrät vertailussa; yhteisenä muuttujana on kierrosnopeus [22]

Kuva 10 (ks. s. 13) havainnollistaa kestopagneettimoottorin kykyä luoda hyvä vääntömomentti pienilläkin kierroksilla. Vertailukohteena on induktiomoottori, jossa vääntömomentti alkaa alemmalta tasolta koneen käynnistyessä, kuin kestopagneettikoneessa. Kestopagneettikoneen tuottaman vääntömomentin ominaisuuksiin palataan tekstissä myöhemmin.

Epätahtimoottorin momentti on suurimmillaan käynnistyksessä ja pienenee nollaan sen saavutettua synkronipyörimisnopeus. Tahtimoottorissa vastaavasti momentti on pienimmillään käynnistyksessä ja kasvaa lähestyttäessä synkroninopeutta. Kestopagneettimoottorissa on siis laaja vääntömomenttialue pienillä häviöillä. [8, s. 14.]

### 5.5.2 Kestopagneetin haitat

Kestopagneettitahtimoottorin ongelmana on se, ettei sillä voida säätää verkossa olevan loistehon määrää hallitusti kumpaankaan suuntaan magnetoinnin huonojen säätömahdollisuuksien johdosta [15, s. 18]. Loistehon säätöön voidaan käyttää esimerkiksi sähköverkkoon liitettäviä erilliskomponentteja, kuten kalliita kondensaattoriparistoja, tai sähköisellä magnetoinnilla varustettuja sähkökoneita.

Kestopagneetit kestävät hyvin kylmiä lämpötiloja, mutta kuumassa niiden magneettiset ominaisuudet heikkenevät. Tämä rajoittaa niiden käytettävyyttä kuumissa olosuhteissa. Paramagneettisiksi magneetit muuttuvat Curie-pisteessä. Curie-lämpötila on SmCo:lla 825 °C ja NdFeB:lla 310 °C. [15, s. 19.]

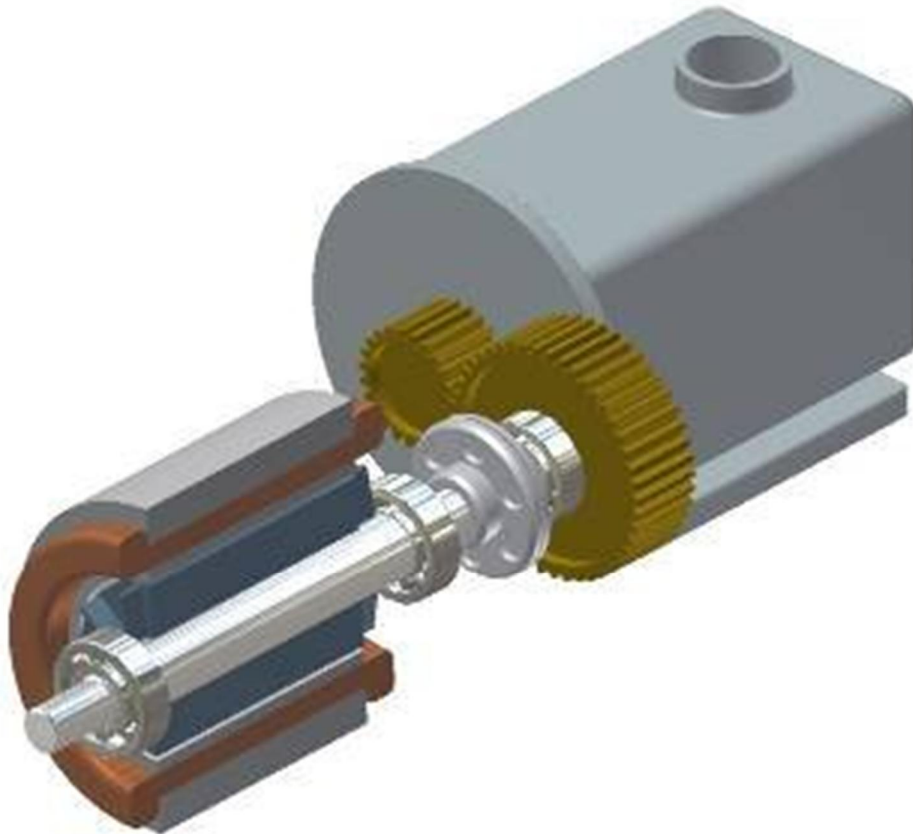
Toinen kuumissa olosuhteissa vastaan tuleva ongelma on käämeissä käytettävien eristemateriaalien lämpötilankesto. Tyypillinen moottorin käämien eristemateriaali kestää 80 - 155 °C. [23, 24.]

Mekaanisen vaimennuksen ja vaimennuskäämityksen puute asettaa tiettyjä vaatimuksia vääntömomentin tasaisuudelle. Kestopagneettitahtikoneen suoran käytön mahdollistaa oikosulkukonetta parempi ohjattavuus pienillä nopeuksilla. Nykyisin nopeuskin voidaan estimoida, jolloin ei aina tarvita edes pulssienkooderia. [10, s. 6.]

### 5.5.3 Aksiaali- ja radiaalivuokoneet

Kestopagneettikoneen päärakennetyyppejä on 2 erilaista. Varhaisempi niistä on radiaalivuokone, sillä se oli aikanaan rakenteellisesti helpompi toteuttaa. Sittemmin kehitetty aksiaalivuokone on vähitellen kumonut kiinni radiaalivuokoneen suorituskyvyn.

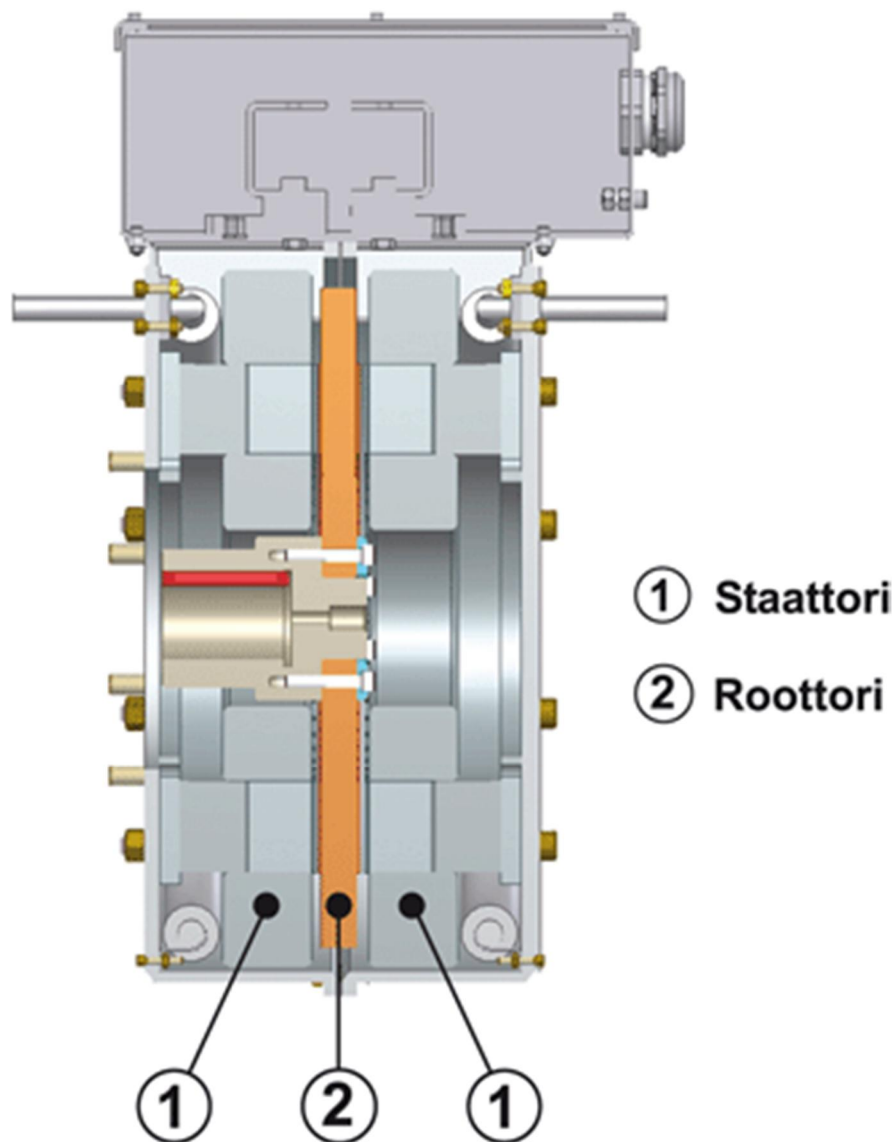
Radiaalivuokoneessa kestopagneetti on roottorin ympärillä ja staattorin vaihekäämitykset taas kestopagneetin ympärillä. Tämä mahdollistaa halkaisijaltaan pienehkön järjestelmän, mutta roottorin akselin pituus kasvaa. Kuvassa 11 näkyy mekaanisesti säädetyn radiaalivuokoneen rakenne. Mekaaninen pyörimisnopeuden säätö tapahtuu hammasratasvaihteistolla. Vaihtoehtoinen keino on käyttää taajuusmuuttajaa tai hihnavaihteistoa, joista jälkimmäinen sopii erityisesti pienille koneille.



*Kuva 11. Radiaalivuokoneen rakenne [25]*

Aksiaalivuokoneessa kestopagneetti on ohuena kerroksena kiekkomaisen roottorilevyn pinnalla, jolloin säästetään tilaa akselin suunnassa. Staattorin magnetointikäämitykset ovat kiekon rinnalla, usein jaettu molemmille puolille roottorin magneettiipiiriä. Tämä vähentää aksiaalisia värinöitä ja pidentää laakereiden käyttöikää.

Yksipuolista kalliimmassa kaksipuoleisessa aksiaalivuorakenteessa on etuna pienempien mekaanisten värinöiden lisäksi myös kasvanut tehotiheys, eli koneesta saadaan ulos suhteellisen paljon tehoa massaansa nähden. Kuva 12 (ks. seur. s.) esittää kaksipuoleisen aksiaalivuorakenteisen roottorin ja staattorien asettelua. [25.]



Kuva 12. Aksiaalivuokone kaksipuolisella rakenteella; staattori on rakennettu roottorin molemmille puolille [25]

#### 5.5.4 Käyttökohteita kestopagneettikoneille

Kestomagneettikoneet soveltuvat sovelluksiin, joissa halutaan korvata tasavirtakäytöt, sekä kohteisiin, joissa energiatehokkuudella on merkitystä. Kestomagneettikäyttö vähentää ja helpottaa moottorin huoltoa. Lisäksi koon ja tehon sekä koon ja vääntömomentin välinen suhde on perinteisempiä sähkömoottoreita parempi. [2, s. 60; 26; 27, s. 1.]

Kestomagneettikoneita käytetään esimerkiksi tietokoneissa, cd-soittimissa, hisseissä, sähköautoissa, paperikoneissa, laivojen potkurijärjestelmissä, pumpuissa ja tuuli-generaattoreissa.

## 6 Momentin riippuvuus sähköisistä suureista

Sähkökoneeseen syötetään virtaa  $I$  tietyllä jännitteellä  $U$  ja taajuudella  $f$ . Virran ja jännitteen tulo määräävät kulutetun tehon  $P$  yhtälön 1 mukaisesti ja taajuus roottorin pyörimisnopeuden  $n$  yhtälön 2 mukaan. Kuitenkin momentti  $M$  on se suure, joka kertoo kuinka paljon voimaa koneesta siirtyy potkurille työntövoimaksi.

$$P = U * I \quad (1)$$

$$n = 60 \frac{s}{min} * f \quad (2)$$

Syötetty teho ei siirry kokonaisuudessaan momenttia tuottavaksi akselitehoksi, vaan sitä pienentävät moottorin häviöt. Näitä ovat muun muassa johtimien lämpöhäviöt, kitka ja moottorin mekaaninen täriinä. Lähes kaikki häviöteho muuttuu hukkalämmöksi.

Häviötehojen jälkeen jäljelle jäävä teho on hyöty- eli antoteho  $P_a$ , jonka avulla saadaan laskettua koneen kokonaishyötysuhde  $\eta$  yhtälön 3 avulla. Hyötysuhdetta voidaan laskea järjestelmän eri väleiltä, kuten esimerkiksi pelkästään moottorin sisään syötetyn ja irti saadun tehon väliltä tai aina moottorinohjaimelta ja akulta asti otettujen tehojen avulla. Näin saadaan kokonaiskuva eri komponenttien tuottamista häviöistä.

$$\eta = \frac{P_a}{P} \quad (3)$$

Ottomoottorissa eli esimerkiksi autoissa käytetyissä bensakoneissa hyötysuhde on noin 25 %. Dieselmoottorilla päästään jo 40 %:n tasolle ja sähkökoneissa liikutaan 80 ja 99 %:n välillä riippuen konetyypistä ja ajotavoista.

Sähkömoottorikäytössä antoteho on käytännössä se teho, mitä akselille saadaan siirrettyä ja kokonaisteho on se teho, mitä järjestelmään syötetään. Kokonaistehoa voi tarkastella monesta eri kohdasta järjestelmää riippuen siitä, minkä järjestelmän osan hyötysuhdetta halutaan tarkastella.

Momenttiin näiden tietojen perusteella päästään yhtälön 4 avulla (ks. seur. s.), missä  $\omega$  on moottorin kulmanopeus. Käytännössä mittauksista on helpompi selvittää momentti,

kuin häviötehot. Kaavan avulla päästään sisään ja ulos syötetyn tehon kautta järjestelmän häviöihin ja hyötysuhteeseen. Häviötehot ovat syötetyn tehon ja antotehon erotus. Tämä esitetään yhtälössä 5, missä  $P_h$  kuvaa häviötehoja. Häviötehot ovat pääasiassa kitkasta ja sähkövirrasta aiheutuvia lämpöhäviöitä.

$$M = \frac{P_a}{2\pi * f} = \frac{P_a}{\omega} \quad (4)$$

$$P_h = P - P_a \quad (5)$$

Toinen tapa esittää momentin syntyminen on yhtälön 6 avulla. Yhtälössä  $C$  kuvaa moottorille ominaista vakiota.

$$M = I * C * \phi \quad (6)$$

Moottorin kulmanopeudesta ja akselin pyörimisnopeudesta päästään potkurin kierrosnopeuteen kulmavaihteiston välityssuhteen jälkeen. Potkurin rakenteesta riippuen se aiheuttaa tietynpituisen liikkeen veneelle yhden potkurikierroksen aikana.

Venekäytössä potkurin kierrosnopeus voi silti olla harhaanjohtava tehonkulutusta arvioidessa. Liikuttaessa veden virtauksen ja tuulen vaikutuksesta, potkurin tyhjäkäyntinopeus voi poiketa nolasta. Liikkeeksi muutettu teho saadaankin laskettua vasta, kun liikkeestä vähennetään tuulen ja veden virtauksen vaikutukset.

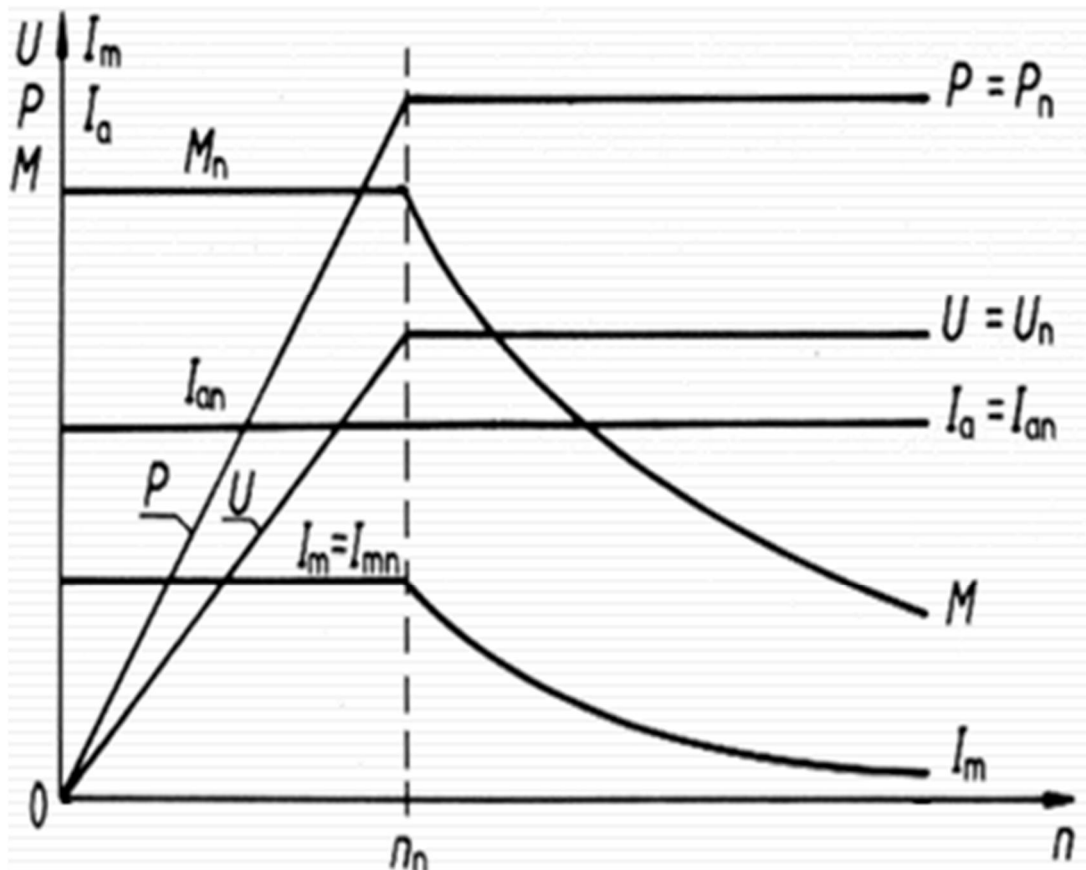
Mekaanista työntövoimaa mitoitettaessa työ on aloitettava potkurikäyrästä. Potkurikäyrillä arvioidaan potkurin hyötysuhdetta ja sen kehittämää vääntöä erilaisilla soveluksissa tarvituilla kierrosluvuilla. Tietyissä tuuliolosuhteissa vaaditaan, että moottori tuottaa jollakin halutulla pyörimisnopeudella vähintään veneen liikettä ylläpitävän voiman ja sen vaatiman momentin.

Erilaisia käyttötilanteita potkurikäyrien mitoituksessa ovat muun muassa erisuuruisen painolastin kuljettaminen avovedessä, pelkän veneen massan kuljettaminen avovedessä, erilaisissa vastatuulissa ja -virroissa kulkeminen sekä paalukäyrä. Paalukäyrä kuvaa tilannetta, jossa alus on paikallaan, ja potkurit pyörivät tietyllä kierrosluvulla.

Tyypilliselle potkurikäyrälle ominaista on se, että tehontarve on verrannollinen pyörimisnopeuden kolmanteen potenssiin [28]. Pyörimisnopeuden kaksinkertaistuuessa tehontarve siis kahdeksankertaistuu.

Kun käyrät on valittu, valitaan moottori, joka tuottaa potkurien vaatiman tehon näillä kierrosluvuilla. Väliin sovitetaan vaihteisto potkurin ja moottorin kierroslukujen mukaan. Mitoituksessa on huomioitava prosessissa esiintyvien komponenttien, kuten vaihteiston, potkurin ja moottorin itsensä hyötysuhteet. Moottori on ylimitoitettava siten, että nämä hyötysuhteet huomioituna potkurille saadaan yhä potkurikäyrien mukainen momentti vaadituilla nopeuksilla.

Kuvassa 13 kuvataan moottorin tuottaman momentin käyttäytymistä sähköisten suureiden kasvaessa. Kestomagneettikoneessa magnetointivirtaa  $I_m$  ei käytetä, vaan sen aikaansaama vuo  $\phi$  syntyy kestopagneettien avulla. Muissa konetyypeissä kuitenkin joudutaan rakenteellisista syistä magnetointivirtaan, joka mukailee kestopagneetin vuon käyrää.



Kuva 13. Momenttikäyrän riippuvuus sähköisistä suureista [29]



Magnetointi syntyy siis käyrän  $I_m$  mukaisesti. Lisäksi koneelle syötetään esimerkiksi sähköverkosta jännite, joka ylittäessään moottorissa syntyvän vastakkaissuuntaisen SMJ:n suuruudella  $U$  saa aikaan koneen virran  $I_{an}$ . Tämä virta aiheuttaa koneessa lämpenemistä ja mitoitetaan sen mukaan, miten paljon lämpenemistä moottorin rakenteet kestävätkin.

Jännitteen  $U$  ja virta  $I_{an}$  tuottavat koneessa tehoa  $P$ . Teho synnyttää koneeseen nimellisen momentin  $M_n$ . Momentti on koneen liikkeellepaneva voima ja kiihdyttää moottorin kierroslukua, kun jännitettä kasvatetaan. Kiihtymistä vastustaa koneen oma massa ja koneeseen kytketty kuorma sekä mm. kitkan hyötätehossa aiheuttamat häviöt.

Tyhjäkäynnin ja nimellinopeuden  $n_n$  välistä aluetta kutsutaan vakiovuoalueeksi. Tämän jälkeistä aluetta kutsutaan kentänheikennysalueeksi. Kentänheikennysalueella kestopagneetti tuottaa juuri sen verran magnetointia, kuin kone toimiakseen tarvitsee.

Jotta nopeutta voitaisiin yhä kasvattaa, on staattorin käämityksessä luotava roottorin magneettivuohon nähden vastakkaissuuntainen vuo. Tämän apuvuon tuottaminen vaatii tietynsuuruisen magnetointiin varatun virran ja heikentää siten hyötysuhdetta suurilla kierroksilla.

Vuon kasvaessa nopeutta voidaan yhä kasvattaa, mutta jännitettä ei. Ylijännite aiheuttaa läpilyönnin moottorin eristeissä, jolloin moottori vioittuu. Nopeuden nostossa on huomioitava, että mikäli moottorinohjain vioittuu ylikierroksilla, kestopagneettimoottori tuottaa systeemille vaarallisen kierrosluvusta riippuvaisen ylijännitteen. Tästä syystä nopeuden nostoa nimellisestä ei voi jatkaa äärettömyyksiin.

Propulsiokäytössä ylikierroksista seuraavat ylijännitteet eivät kuitenkaan ole ongelma, sillä veneiden ja laivojen rakenteista johtuen suurille ylikierroksille ei ole järkevää mennä. Lisäksi kuormitus on propulsiossa ylikierroksilla yleensä erittäin suuri, jolloin moottorinohjaimen pettäessä veden vastus tiputtaa kierrosluvun nopeasti alas.

Koska jännite ja virta ovat nyt vakioita, on tehokin vakio. Näitä kutsutaan nimellisjännitteeksi  $U_n$  ja -tehoksi  $P_n$ , ja niiden alkukohdassa on saavutettu moottorin nimellinen nopeus  $n_n$ .

Momentti on verrannollinen tehon suuruuteen ja kääntäen verrannollinen kierrosnopeuden suuruuteen. Koska teho on saavuttanut nimellisen arvonsa, momentti pienenee kierrosluvun kasvaessa yli nimellisensä. Kierrosnopeutta voidaan koneessa kasvattaa siihen pisteeseen asti, jossa kuorman vastamomenttikäyrä leikkaa työkoneen momentin käyrän.

Tuotetun momentin huippuarvoa kutsutaan kippimomentiksi. Jos kuorman momentti ylittää kippimomentin, koneesta saatu teho ei enää riitä ylläpitämään sen hetkistä nopeutta. Tällöin yleensä kone pysähtyy, ja prosessi keskeytyy. Pahimmassa tapauksessa jokin laitteiston osa hajoaa lopullisesti. [29.]

## 7 Moottorin kuormitettavuus

### 7.1 Kuormitukseen liittyvä lämpöaikavakio

Valmistaja ilmoittaa jokaiselle moottorille tyyppikilvessä, miten kone on asennettava ja miten kuormitettava. Näitä noudattamalla kone saavuttaa maksimilämpenemän  $\theta_{\max}$ , joka ei aiheuta rakenteellisia vaurioita. Kuitenkin koneen kuormittaminen siten, että se on lämmennyt yli maksimilämpenemänsä, lyhentää koneen elinikää merkittävästi.

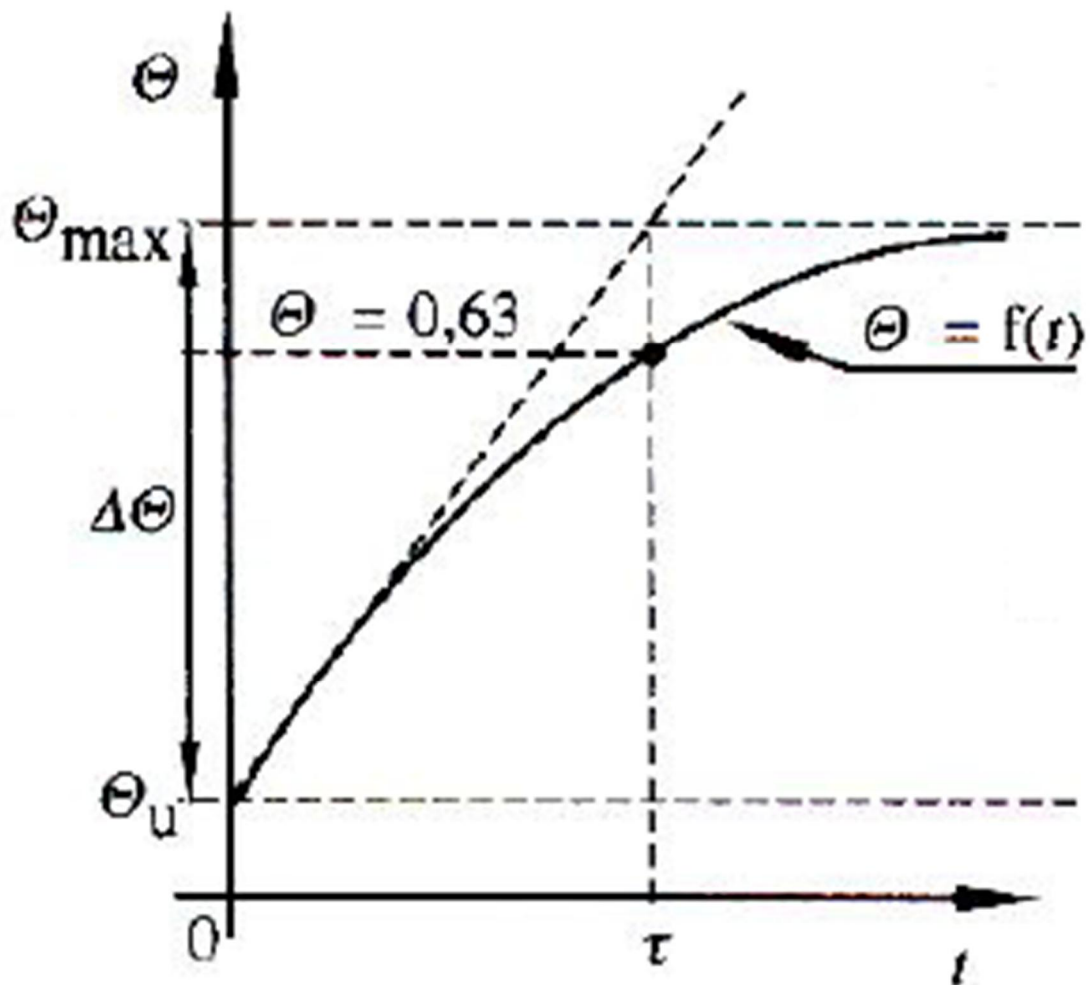
Yksinkertaistetussa tapauksessa sähköjohtimen lämpeneminen noudattaa kuvassa 14 (ks. seur. s.) näkyvää lämpenemiskäyrää. Kuvan symboli  $\theta_u$  merkkää ympäristön lämpötilaa ja näin ollen lämmitettävän koneen alkulämpötilaa. Kun johdin on lämmennyt 63 % loppuarvostaan, se on lämmennyt yhden  $\tau$ :n verran. Neljän  $\tau$ :n kohdalla se on lämmennyt maksimista noin 98 % ja tällöin voidaan todeta johtimen saavuttaneen riittävän hyvin loppuarvonsa.

Mitä suurempi on lämmitettävä massa, ja mitä huonompi on jäähdytys, sen pidempi on aikavakio. Loppulämpenemän suuruus taas riippuu virran suuruudesta. Se on likimain verrannollinen virran neliöön. Virran suuruus ei sen sijaan vaikuta aikavakioon.

Muut loppulämpenemään vaikuttavat tekijät ovat ympäristön lämpötila ja jäähdytyksen tehokkuus. Mikäli nämä tekijät ovat vakioita, moottori lämpenee aina tietylle vakiosuuruiselle tasolle. Mikäli jäähdytyksen tasoa heikennetään, ympäristön lämpötila kasvaa

tai moottorille syötetyn virran suuruutta kasvatetaan, moottorin loppulämpötilan taso nousee. Vastaavasti jäähdytyksen parantuessa, ympäristön jäähtyessä tai moottorille syötetyn virran pienentyessä, loppulämpötilan taso laskee.

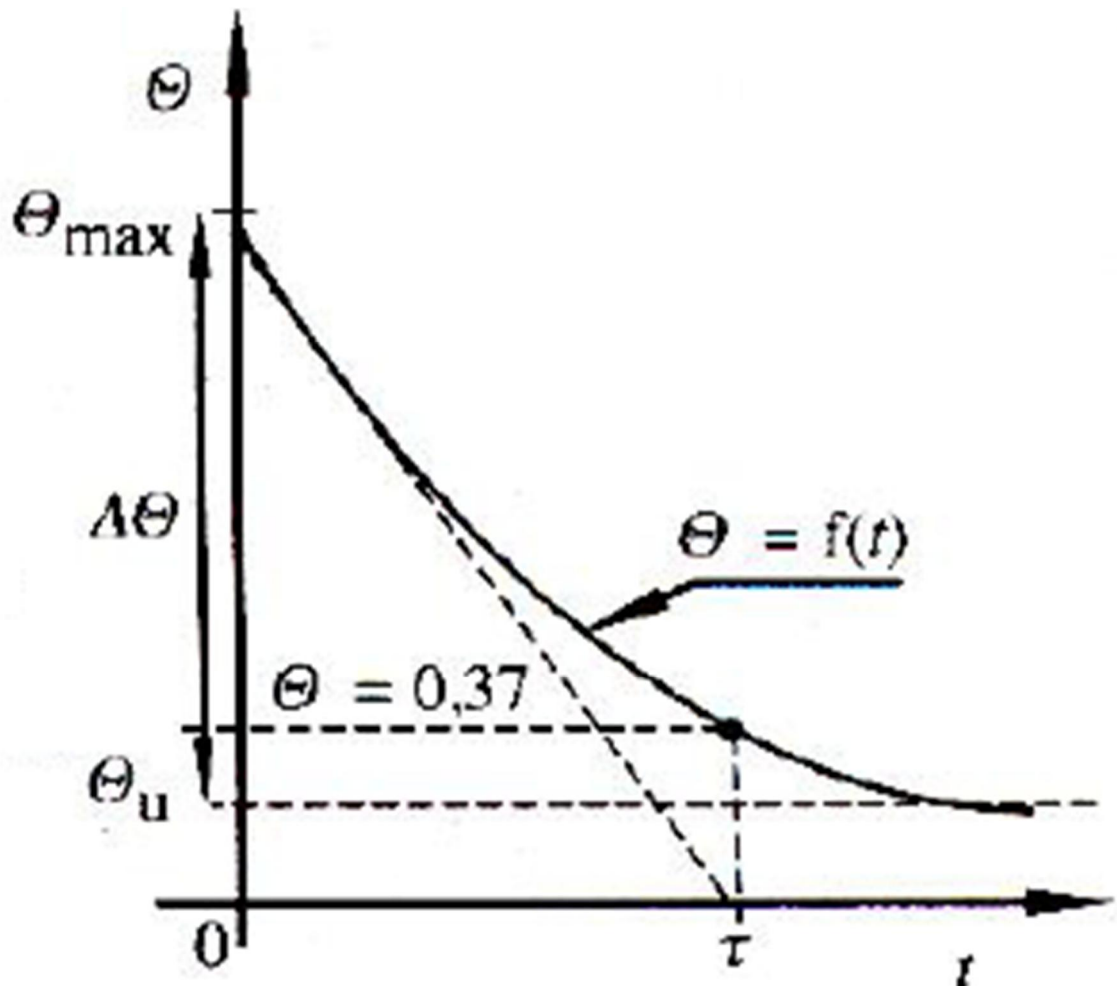
Mikäli tunnetaan maksimilämpenemä, voidaan aikavakio määrittää sen avulla piirtämällä lämpenemiskäyrän alkupään tangentin suuntainen suora sekä lämpenemäakselin poikki kulkeva maksimilämpenemän suuruudella kulkeva suora. Näiden suorien leikkauksessa on saavutettu aikavakio  $\tau$ .



Kuva 14. Lämpöaikavakion käyrä  $\Theta = f(t)$  [29]

Vastaavasti, jos tunnetaan aikavakio, voidaan määrittää maksimilämpenemä. Piirretään lämpenemiskäyrän alkutangentin suuntainen suora ja aikavakion  $\tau$  kohdalla pystysuoraan kulkeva suora. Näiden leikkauspisteestä nähdään maksimilämpenemän suuruus. Tätä määrittäytapaa pidetään kuitenkin epätarkkana, eikä sitä suositella kuin kärkeään arviointiin [5].

Jäähtyminen tapahtuu vastaavalla tavalla kuin lämpeneminen, mutta aikavakio saattaa olla toinen. Jäähtymisaikavakio on esitetty kuvassa 15. Monissa koneissa on lämmityksen aikainen tuuletus lyhentämässä aikavakiota, mutta jäähtymisen aikana virta on katkaistu, ja näin ollen tuuletuskaan ei toimi. Sen vuoksi aikavakio voi jopa moninkertaistua jäähtyessä. [30, s. 398 - 399.]



Kuva 15. Jäähtymisaikavakion käyrä [27]

## 7.2 Moottorin ylikuormittaminen

Koska kestopagneettikoneen roottorissa on vakiomagnetointi, on sen ylikuormittaminen roottorin magnetointia muuttamalla lähestulkoon mahdotonta. Staattoriin syötettävät sinimuotoiset vaihtovirta ja -jännite saavat aikaan staattorin ankkurikäämeissä magnetoinnin, joka reagoidessaan roottorin magnetointiin mahdollistaa roottorin pyörimisen.

Staattorivirran napakulmaa kääntämällä siihen suuntaan, jossa magnetointi suhteessa kestopagneetin magnetointiin kasvaa, mahdollistaa ylikuormituksen. Napakulmaa käännetään moottorinohjaimen avulla, joka hallitsee moottorille syötettyjä sähköisiä suureita. Kun roottorin magnetointi on vakio, ja staattorissa kasvatetaan vastakkaisuuntaista magnetointia, koneen näkökulmasta magnetointi on siis kasvanut ja näin aikaansaadaan nimellistä suurempi momentti.

Mikäli tämä lisämagnetointi menetetään kentänheikennysalueella, kasvaa jännite tietyissä käytöissä yli nimellissensä kierrosluvun suuruuden mukaan. Ylijännitteelle herkkimmät osat, kuten moottorinohjaimen puolijohteet, ovat vaarassa hajota. Propulsio-käytössä tämä ei kuitenkaan ole todellinen ongelma.

Syöttämällä moottorille nimellistä suurempi virta, on mahdollista saavuttaa nimellistä suurempia momentteja. Tämä kuitenkin johtaa liialliseen lämpenemiseen. Lämpenemistä voidaan estää parantamalla jäähdytystä. Jos jäähdytystä ei paranneta, on moottoria silti mahdollista ylikuormittaa, mutta vain hetkellisesti.

Ylikuormituksen suuruuteen liittyy useita rajoitteita. Nopein ylikuormitukseen reagoiva komponentti on moottorinohjain, jossa puolijohteet palavat sekunneissa liiallisen ylikuormituksen seurauksena. Tämän takia puolijohteiden virran- ja jännitteenkesto onkin mitoitettava nimellispisteitä selvästi korkeammalle, jotta hetkelliset piikit eivät vaurioita koneen toimintaa. Hetkellisiä piikkejä moottorissa on esimerkiksi käynnistysvirtapiikit, jotka voivat olla lepokitkan voittamisen ja kiihdytyksen tarpeen vuoksi suuria.

Ylikuormitettaessa moottoria puolijohteiden sallimissa rajoissa vastaan tulee seuraavaksi termiset mitoitukset. Käytettäessä moottoria sen nimellisillä arvoilla, osat kestävät koneessa tapahtuvan lämpenemän jatkuvassakin käytössä. Herkimpiä osia lämmölle ovat yleensä käämityksen eristeaineet. Lisäksi ne ovat kiinni käämityksessä, joka on moottorin eniten kuumeneva komponentti. Pitkissä ylikuormitustilanteissa moottori lämpenee liian paljon, jolloin sen osat eivät kestä enää vallitsevaa lämpötilaa. Mitä rajumpi ylikuormituksen aste on, sitä nopeammin kone ylikuumenee.

Ylikuormitettavuuteen vaikuttaa myös ympäristön lämpötila. Mikäli ympäristön lämpötila on kovin korkea, ei moottorin lämpenemä voi olla edes nimellinen, ennen kuin sen kestävät raja-arvot saavutetaan. Toinen vaikuttava tekijä on moottorin jo saavuttama

lämpenemä, kun ylikuormitus aloitetaan. Mikäli moottoria on jo ajettu nimellisarvoillaan pitkiä aikoja taukoamatta, kun ylikuormitus aloitetaan, ovat eristeetkin saavuttaneet jo korkean lämpötilan. Tästä syystä niitä ei voi ylikuormittaa niin kauan kuin voitaisiin tilanteessa, jossa moottoria aletaan ylikuormittaa sen ollessa lepotilassa ja jäähtyneenä ympäristön lämpötilaan. [29.]

## 8 Oceanvolt Ltd -yritys

### 8.1 Oceanvolt Ltd -yrityksen toiminta

Oceanvolt Ltd kehittää propulsiokäyttöön tulevaa kestopagneettimoottoria, jota voidaan tarvittaessa käyttää myös generaattorina. Sähkomoottori luo edellytykset liikkua äänettömästi ja ketterästi rantautuessa ja avovesille siirryttäessä. Lisäksi se mahdollistaa purjeveneiden etenemisen vastatuuleen.

Moottorin on tarkoitus toimia noin kymmenmetristen vapaa-ajan purjeveneiden moottorina. Se toimii lähtökohtaisesti akustolla purjeveneissä, mutta pitempiä aikoja on mahdollista ajaa poltto- ja sähkomoottorin hybridikäytöllä. Hybridikäytössä polttomoottori tuottaa sähköenergiaa, jonka sähkomoottori muuttaa liike-energiaksi.

Moottori on saksalaisen Perm Motor GmbH yrityksen valmistama moottori. Se on rakennettu PMS 154W tyyppin pohjalta. PMS 154:ssä jäähdytys on suunniteltu ilma- tai vesikiertoiseksi. Oceanvolt on kehittänyt tätä jäähdytysjärjestelmää eteenpäin.

Moottoriin on rakennettu öljynkiertojärjestelmä, jota pyörittää akselille lisätty sisäänrakennettu pumppu. Ideana on kierrättää akselin voiteluöljyä moottorin ympärillä ja siten sitoa lämpöä moottorista. Lämpö johdetaan vetolaitteen kautta veteen. Tämän tarkoitus on pienentää jäähdytysjärjestelmää ja siten koko järjestelmää entisestään, parantaa hyötysuhdetta ja vähentää konehuoneen tilantarvetta veneessä.

### 8.2 Oceanvolt iBoats -hankkeessa

Yritys toimii yhteistyössä Intelligent Boats-kehitysprojektissa kymmenen yrityksen, Meripolustusseuran, Tampereen Teknillisen Yliopiston, Satakunnan ammattikorkeakoulun,

Rajavartiolaitoksen, Metropolia ammattikorkeakoulun ja Tekesin kanssa. Kehitysohjelmassa tutkitaan veneiden ohjausjärjestelmiä, ohjelmistoja ja laitteiden toimintaa verkossa.

Hankkeessa on tavoitteena kehittää suomalaista veneteollisuuden osaamista. Oceanvoltin purjevereen apumoottorin lisäksi iBoatsilla on seuraaviin kategorioihin liittyviä hankkeita vireillä: työveneen ohjaus, monitoimiveneen toimilaitteet, purjevereen ankurit ja ohjaus sekä digitaalihydrauliikan sovellukset. [31; 32.]

### 8.3 Oceanvolt ePropulsion -hankkeessa

Oceanvolt on myös mukana neljän yrityksen ja Metropolia ammattikorkeakoulun yhteisessä ePropulsion -hankkeessa, jonka tavoitteena on edistää toteutettavien propulsioon tarkoitettujen järjestelmien energiatehokkuutta. Ratkaisuja pyritään tuottamaan sekä pelkkiin sähkökäyttöihin, että hybridikäyttöihin.

Ratkaistavat ongelmat liittyvät propulsiolaitteiston eri osien yhteensopivuuteen. Oletuksena on: mitä paremmin moottorinohjain, akusto ja muut komponentit toimivat saumattomassa yhteistyössä, sen energia- ja kustannustehokkaampaan ratkaisuun päästään. [33.]

### 8.4 Moottorivalintaan liittyviä perusteita

Veneeseen asennettavan sähkömoottorin valinnassa oleellisia tekijöitä ovat muun muassa mekaaniset mitat, massa, hyötysuhde, moottorin kyky tuottaa momenttia eri kierrosnopeuksilla ja melutaso erilaisilla kuormituksilla ja kierrosnopeuksilla. Koska veneillä ollaan avovesillä, ovat myös moottorin luotettavuus ja huollettavuus erittäin oleellisia tekijöitä.

Veneissä tilankäyttö on tärkeää, ja moottorien tilantarve halutaan minimoida. Massa taas vaikuttaa moneen tekijään, muun muassa veneen syväykseen ja sitä kautta maksiminopeuteen. Luotettavuuden ja huollettavuuden on oltava mahdollisimman hyvällä tasolla, sillä moottorin kuormitus on kovimmillaan yleensä juuri huonoimmissa ympäristöolosuhteissa, jolloin sitä myös tarvitaan eniten.

Luvussa 5 (ks. s. 8 - 16) esiteltiin tyypillisiä sähkömoottorityyppejä. Siinä esitetyn tiedon perusteella voidaan reluktanssimoottori jättää täysin huomiotta venemoottoria valittaessa, sillä mahdollisuudet käyttää sitä generaattorina ovat heikot. Tahti- ja epätahtimoottorit taas ovat varsin kookkaita ja raskaita koneita ja askelmoottorin tuottamat momentit eivät riitä suurten massojen liikuttamiseen. Lisäksi kestopagneettimoottorin moottori saadaan toteutettua helposti harjattomana, joten sen kustannukset pysyvät kurissa ja toimintavarmuus paranee.

Valintavaiheessa yritys testasi kolmea kestopagneettikoneetta ja yhtä induktiokoneetta. Induktiokoneen hyötysuhde oli oletetusti kohtuuttoman pieni alhaisilla kierrosluvuilla. Kestopagneettikoneiden hyötysuhteet olivat lähempänä toisiaan. Jatkojalostukseen valittu kone, PMS 154W, oli ainoa harjaton kestopagneettikone.

## 8.5 Esimerkki käyttökohteesta

Moottoria voidaan käyttää erilaisilla potkureilla, erilaisissa veneissä, eri olosuhteissa, erisuuruksilla energiavarastoilla ja monin muin tavoin täysin toisistaan poikkeavilla kokonaisuuksilla. Ympäristötekijöiden, potkurien ja veneiden täsmällisiä toimintamalleja on lähes mahdotonta esittää tarkasti matemaattisilla kaavoilla. On kuitenkin olemassa laskentamalleja, joiden avulla voidaan tutkia jokseenkin tarkasti, millaista suorituskykyä moottorilta vaaditaan. Tässä luvussa esitetään eräälle venetyypille laskettuja toimintasäteitä ja kuormituksia eri ympäristöolosuhteissa eri ajotavoilla.

Esimerkkivene on 10 metriä pitkä ja painaa 5 tonnia. Sitä ohjataan PMS 154W -moottorilla. Akuston kapasiteetti on 160 Ah ja nimellisjännite 52 V. Varaus voidaan purkaa 80 prosenttisesti, joten käytössä on 128 Ah. Tästä saadaan yhtälön 7 avulla laskettua käytettävissä oleva energiamäärä.

$$E = C * U = 0,8 * 160 \text{ Ah} * 52 \text{ V} = 6656 \text{ kWh} \quad (7)$$

Laskelmiensa avulla yritys on päässyt arvioon, jossa edellä mainitun tyyppinen systeemi kykenee liikkumaan korkeintaan 6,7 solmun nopeudella. Tyynessä säässä toimintasäde on neljän solmun nopeudella 46 km, viiden solmun nopeudella 28 km ja kuuden solmun nopeudella 15 km. Luvussa 6 (ks. s. 17 - 21) kerrottiin potkuritehon rajusta



kasvusta nopeuden kasvuun nähden. Tämä näkyy myös äsken esitetyissä tuloksissa. Kolmanneksen lisäys nopeuteen lyhentää toimintasädettä noin kolmannekseen.

## 9 Koestusjärjestelyt

Koestuksessa selvitetään, kyetäänkö moottorilla suorittamaan tyypillisiä ajoja ilman liiallista lämpenemistä. Lisäksi tutkitaan, millaisia ohjeita ja rajoituksia loppukäyttäjälle tulee laatia. Ajotavat perustuvat arvioihin siitä, millaisia käyttökohteita veneillessä voi olla. Mikäli moottorin rakenne lämpenee liian kuumaksi, on mittaus keskeytettävä. Moottorin rakenteiden ylin sallittu lämpötila on käämien eristeiden lämpötilankestä.

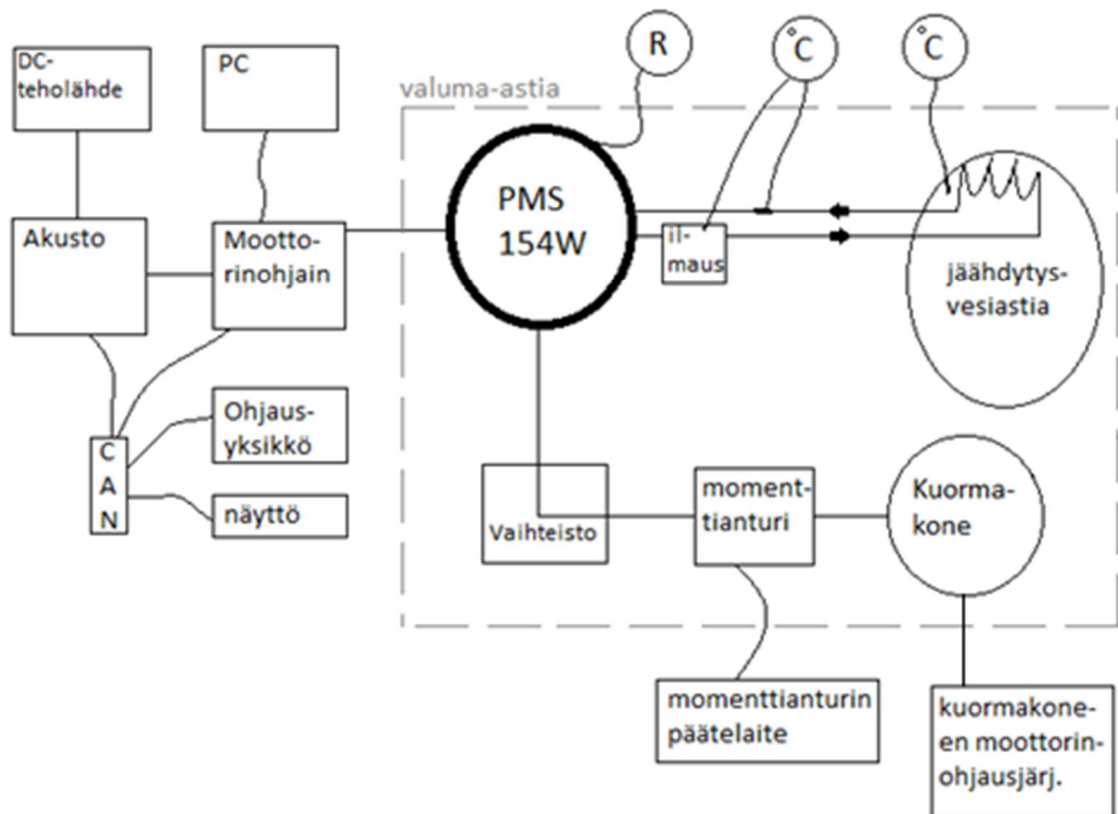
Huomioitavia tekijöitä ovat jäähtymisen vaikutus, vastamomentin suuruus ja kierrosluku, joista jälkimmäiset määritellään etukäteen. Lisäksi oleellisia tekijöitä ovat järjestelmän eri osien lämpötilat eri hetkinä ja järjestelmän kokonaishyötysuhde, josta selviää lämpöhäviöiden määrä.

### 9.1 Mittauksessa käytettävä koelaitteisto

Ensimmäisessä mittauksessa käytetty laitteisto esitellään tässä luvussa. Koelaitteisto koostuu useista eri osakomponenteista. Siihen kuuluu mm. mittalaitteita, testattava moottori, sen käyttämiseen tarvittava kalusto, kuormakone sekä sen ohjausjärjestelmä. Mittausten edetessä kuitenkin ilmeni uusia koelaitteistoon kohdistuvia vaatimuksia.

Mittalaitteistoon kuuluu lämpötila-antureita, yleismittareita, momenttianturi, sen näyttöpääte, sekä moottorinohjauspuolelle liitettävä valvontalaitteisto. Tämä valvontalaitteisto kertoo muun muassa virrankulutuksen, käyttöjännitteen, moottoriin kytköksissä olevan akuston varausasteen, moottorin kierrosluvun ja moottorin säätimen lämpötilan.

Moottorin käyttöön liittyy useita erilaisia lisälaitteita. Niitä ovat akusto, akuston latausyksikkö, moottorinohjain, näyttöpääte, säädin, CAN -väylä sekä moottorinohjausyksikkö. Kuvassa 16 (ks. seur. s.) esitetään osien sijainti testissä, sekä niiden kytkeytyminen toisiinsa.



Kuva 16. Testilaitteiston kytkentäkaavio

Kuvassa 16 kaarevat johdotukset kuvaavat tietoa siirtäviä johdotuksia, kuten mittajohdot ja CAN -väylän tiedonsiirtojohtoja. Suorat johdotukset ovat sähkön- ja voimansiirtoväyliä. Moottorin ja jäähdytysvesiastian välillä olevat suorat ovat moottorin ulkopuolella kulkeva osa öljykanavasta ja siinä olevat nuolet kertovat öljyn kiertosuunnan. Mekaaninen voimansiirto tapahtuu PMS 154W:n ja kuormakoneen välillä, jonka suuruutta momenttianturi mittaa.

#### 9.1.1 CAN -väylä

CAN -väylä (*Controller Area Network*) suunniteltiin alun perin autojen hajautettujen ohjausjärjestelmien reaaliaikaiseen tiedonsiirtoon. CAN -väylää voi käyttää esimerkiksi moottorinohjausyksikön, ABS-jarruysikköjen ja vaihteistonohjausyksikön väliseen kommunikointiin.

CAN -väylää voidaan käyttää missä tahansa sovelluksessa, jossa tarvitaan useiden laitteiden välinen reaaliaikainen kommunikointi. Tässä työssä CAN -väylän avulla kommunikoidaan akuston, moottorinohjaimen, säätimen ja näyttöpaneelin välillä. (Ks. liite 1, CAN -väyläasia.) [34.]

### 9.1.2 Akusto ja latausjärjestelmä

Akusto koostuu Litium-kennoista. Sarjoitettujen kennojen jännite on 52 V ja kapasiteetti 160 Ah. Tehoa siitä saadaan 8 kW.

Litium-akuissa on verrattain korkea tehotiheys (300 - 1 000 W/kg) sekä energiatiheys (90 - 190 Wh/kg). Lisäksi niiden hyötysuhde on varsin hyvä (95 %) ja latauskertojen määrä korkea. Ne tosin ovat yllädatessa räjähdysherkkiä ja tarvitsevat siten ylimääräistä latauselektroniikkaa, joka katkaisee virran varauksen täytyessä.

Litium-akuista voidaan hyödyntää 80 % niiden varaamasta energiasta. Loput 20 % on jätettävä kennostoon, jotta sitä voidaan käyttää uudestaan.

Litium-akuissa ei käytetä muille akkutyypeille tyypillistä ylläpitovirtaa. Niiden lataus voidaan suorittaa niin monessa toisistaan irrallisessa pätkässä, kuin halutaan, sillä niillä ei ole muilla akuille ongelmallista muistiominaisuutta. [35; 36 s. 47; 37].

Energia- ja tehotiheydensä ansiosta Litium-akku on kevyt ja pienikokoinen muihin akkutyyppeihin verrattuna. Lisäksi sen kyky ottaa vastaan latausvirtaa useissa lyhyissäkin pätkissä menettämättä varausominaisuuksiaan on omiaan propulsiokäytössä, kun latausta ei voida aina suorittaa kerralla alusta loppuun.

Litium-akut on kuitenkin syytä säilyttää metallikotelossa siten, että sinne ei pääse kosteutta. Kosteus lyhentää niiden käyttöikää. Tähän on erityisesti kiinnitettävä huomiota venekäytössä, jolloin ympäristössä esiintyy paljon kosteutta. [38.]

Akuston varauksen tilaa valvotaan mittaamalla, ja tieto siirtyy CAN -väylää pitkin muihin sovelluksen osiin. Mittaustietojen avulla voidaan arvioida jäljellä olevaa ajoaikaa.

Taulukosta 1 nähdään Litium-akkutyyppeiden energia- ja tehotiheyksien ylivoimaiset ominaisuudet Nikkeli- ja lyijyrakenteisiin akkuihin. Superkondensaattorin ja vauhtipyörän itsepurkautumisnopeudet ovat niin suuria, etteivät ne kykene varastoimaan energiaa riittävän pitkiä aikoja. SMESiä voidaan taas hyödyntää korkeintaan 70 K:ssa, joten se vaatii lisäenergiaa jäähdytykseen ja kokonaan oman kalliin ja tilaa vievän laitteiston sitä varten. [37.]

Taulukko 1. Eri energiavarastojen ominaisuuksia [37]

	Energiatiheys [Wh/kg]	Tehotiheys [W/kg]	Hyötysuhde %	Lataussykliä määrä(80% DOD)	Solujännite [V]
Lyijyakku	25-50	75-130	80	200-300	2
Nikkeli- kadmiumakku	35-80	50-200	80	>1000	1.2
Nikkeli- metallihydriakku	50-120	150-250	65	<1000	1.2
Litium-ioniakku	90-190	300-1000	>95	1000-3000	2.5-4.2
Litium- polymeeriakku	100-150	100-315	>95	~1000	2.5-4.2
Litium- titanaattiakku	60-70	4000	~90	>5000	2.4
Superkondensaattori	1-10	<6000	90-98	~1000000(100%DOD)	0.9-2.7
SMES	4-75	100000	98		
Vauhtipyörä	100	1600	>90	$10^5$ - $10^7$ (100%DOD)	

Latausjärjestelmänä mittauksissa toimii kaksi identtistä DC-teholähdettä. Toinen teholaähde on laitetuottajan aikataulujen puolesta saatu käyttöön 8.4.2011 toteutetuissa mittauksissa (ks. s. 57). Niiden käyttöjännite on 0 - 72 V ja maksimi ulostulovirta 64 A. Niiden syöttämä teho on kaavan 1 (ks. s. 17) mukaan laskettuna korkeintaan 4,608 kW kullakin. Moottorinohjainta voidaan kuitenkin käyttää korkeintaan 60 V:n suuruisella jännitteellä, jolloin latausjärjestelmästä moottorille saatu teho on 3,24 kW. Kestomagneettimoottorin nimellisteho on 8,6 kW. Testimahdollisuuksia laajentaa akusto, sillä sitä voidaan käyttää lyhyissä kuormitusilanteissa teholähteiden sijasta. Akuston ja teholähteiden rinnankäyttö ei ole testissä mahdollista. (Ks. liite 2, DC -teholähde.)

### 9.1.3 Moottorinohjainyksikkö

Moottorinohjausyksikköä ohjaa mikrokontrolleri, joka ohjelmoidaan etukäteen. Sen toimintaa hallitaan muutamalla painonapilla, joilla säädetään moottori pyörimään joko momentti- tai nopeusohjauksella. Momenttiohjaus pyrkii ylläpitämään tietyn moottorin tuottaman momentin, nopeus määräytyy ympäristössä esiintyvien vastustavien tekijöiden (tuuli, virtaukset, yms.) vaikutuksesta. Nopeusohjauksella koneeseen syötetään tehoa tietyn kierrosluvun ylläpitämiseksi, jolloin ympäristöstä alukseen kohdistuvat liikettä vastustavat voimat aiheuttavat moottorissa ylimääräisen momentin tuotannon. Lisäksi voidaan kääntää potkurin pyörimissuuntaa.



*Kuva 17. Moottorinohjaimena käytettävä taajuusmuuttaja [39]*

Mikrokontrolleripiiriltä lähetetään ohjaustieto CAN -väylää pitkin invertterille (taajuusmuuttajalle), joka syöttää halutun taajuista ja suuruista virtaa moottorille tietyllä jännitteellä. Nämä arvot mitataan ja tiedot syötetään CAN -väylälle. Tietojen avulla lasketaan moottorin pyörimisnopeus, tuotettu momentti sekä virran- ja tehonkulutus.

Moottorinohjain kuvassa 17 syöttää moottorille koko sen käyttämän tehon. Koska kyse on suurista virroista, moottorinohjaimessa syntyy lämpöhäviöitä. Se pyrkii jäähdyttämään itseään käynnistämällä tuulettimen lämpötilan yllettyä 40 asteeseen.

Moottorinohjain toimii tarvittaessa myös latausjärjestelmänä, eli se muuttaa moottorilta tulevan kolmivaiheisen vaihtosähkön tasasähköksi moottorin toimiessa generaattorina. Käytössä on siis sekä potkurin pyörintä molempiin suuntiin että koneen toiminta ajoittain moottorina ja ajoittain generaattorina. Tätä kutsutaan nelikvadranttikäytöksi.

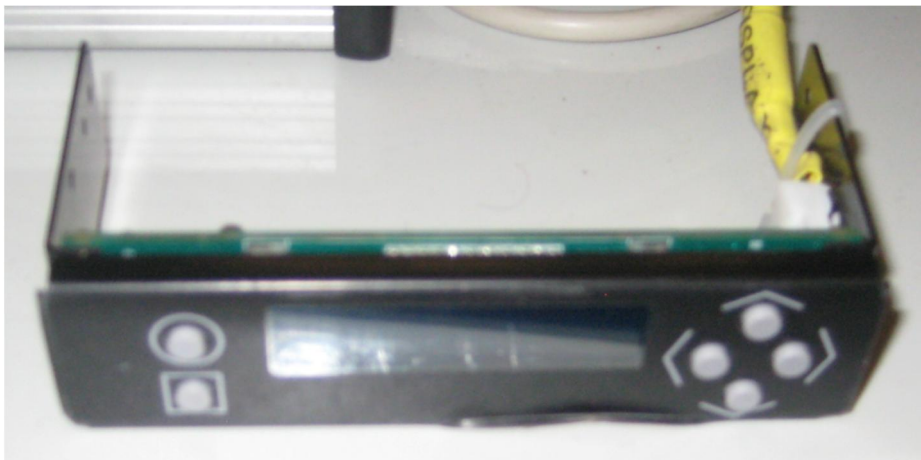
Invertterin perusideana on tuottaa tasasähköstä halutuntaajuista vaihtosähköä. Ilman taajuusmuuttajan aikaansaamaa säädettävyyttä, ei vaihtosähköllä toimivissa moottoreissa olisi käynnissä ollessaan kuin yksi, verkkotaajuudesta riippuva nopeus. Akustosta saadulla tasasähköllä moottorinohjaus olisi tällaisessa tilanteessa mahdotonta.

Taajuusmuuttaja siis mahdollistaa portaattoman nopeudensäädön, mutta se myös parantaa kokonaishyötysuhdetta energiankulutuksen osalta. Taajuusmuuttaja on yksi merkittävimpiä moottorikäyttöjen energiatehokkuuteen liittyviä parannuksia viime aikoina. Se poistaa mekaanisten välitysten tarpeen sähkömoottoreissa, joissa tyypillisesti on taajuudesta riippuvainen vakionopeus ja nimellinen käyntinopeus huomattavasti potkurin kierroslukua korkeampi.

Taajuusmuuttaja siis poistaa mekaanisen vaihteiston tarpeen moottorin perästä tilanteissa, joissa tilansäästö on oleellista. Tyypillisesti alennusvaihteiston poistaminen kasvattaa moottorille asetettuja vaatimuksia momentin suhteen ja siten myös sen kokoa, jolloin tilansäästöä ei välttämättä synny. Kestomagneettikoneen kyky tuottaa momenttia pienilläkin kierroksilla kompensoi tätä ongelmaa.

Mekaanisesta vaihteistosta luovuttaessa poistuu myös yksi kuluva osa systeemin väliltä. Taajuusmuuttaja on pienikokoinen laite mekaanisiin vaihteistoihin nähden ja sen voi sijoittaa etäälle moottorista.

#### 9.1.4 Näyttö



Kuva 18. LCD -näyttö

Testijärjestelmässä on kuvassa 18 näkyvä LCD -näyttö, joka indikoi moottorin ohjaajalle tärkeimpiä tilatietoja laitteistosta. Näitä ovat akuston virrankulutus, akuston jäljellä oleva kapasiteetti ja akkukennoston jännite. Lisäksi se indikoi yksittäisten kennojen ylimmän ja alimman jännitteen. Tämän avulla valvotaan, etteivät yksittäiset kennojen jännitteet putoa alle sallitun 2,4 V:n rajan. Tiedot näyttöön kulkee CAN -väylän avulla.

### 9.1.5 Moottori

Työssä testattava moottori on PMS 154W. Se on 8,6 kW:n tehoinen kestmagneetti-moottori, jonka magneetit ovat sijoitettuna roottoriin. Tämä mahdollistaa harjattoman magnetoinnin ja vähentää näin mekaanisesti kuluvia osia. Nimellismomentti on 32,85 Nm ja nimellispöörimisnopeus 2 500 rpm.

Konetyypiltään se on kaksipuolinen aksiaalivuokone, eli staattori koostuu kahdesta levypakasta, joissa on vaihekäämitykset. Näin on saatu akselin suunnassa lyhyt rakenne ja korkea tehotiheys. (Kuvat moottorista, sen magneeteista, staattorin käämityksestä ja moottorin teknisistä tiedoista, ks. liitteet 3 - 9.)

Moottori on kiinni vetolaitteessa, jonka päässä on venekäytössä potkuri. Potkurin halkaisija on noin 15 tuumaa ja sen on tarkoitus kehittää suurimmillaan noin 1 500 N voima. Testeissä potkuria ei käytetä. Staattorit ovat kiinni ylä- ja alalaipoissa. Laipoissa kiertää kanavat, joissa voitelu/jäähdytysöljy kiertää. Moottorinvalmistaja suosittelee jäähdytysöljylle vähintään 6 l/min kiertonopeutta järjestelmässä. (Ks. liite 10, PM - moottorin laipan öljykanava.)

Koneen eristysluokka on F [40]. Luokan F moottori kestää 155 asteen toimintalämpötilan. Ympäristön ollessa lämpimämpi, moottorille jää vähemmän lämpenemisvaraa. Suositeltavaa on kuitenkin jättää lämpenemälle 10 asteen marginaali. Moottorin eliniän pidentämiseksi laitevalmistaja suosittelee laitteen käyttöä alle 125 asteessa [40]. Ohjeavona pidetään, että moottorin käyttölämpötilan pudotessa 10 asteella, sen elinikä kasvaa noin 50 %. (Ks. liite 11, IEC -standardit 60034-6 ja 60034-1) [30].

Liitteessä 11 on myös moottoreille tyypillisiä jäähdytystapoja. Työssä käytetty kone ei kuitenkaan sovellu mihinkään liitteessä mainittuun luokkaan. Jäähdytysluokista poikkeavan siitä tekee jäähdytysaineena käytetty öljy, ja suljetussa, akselille kiinnitetyn pumpun aiheuttamassa virtauksessa kulkeva jäähdytysaine.

Moottorissa on sisäänrakennettu K-typin anturi KTY84/130 mittaamassa käämien lämpötilaa. Se reagoi lämpötilan muutoksiin sisäisen vastusarvon muutoksilla. (Ks. liite 12, KTY84 -anturien vastusarvotaulukko.)

Roottorin sekä staattorin välillä ja akseleiden ympärillä käytetään voiteluöljyä. Normaalikäytössä tämä lämpenee, joka johtaa koko laitteiston lämpenemiseen. Järjestelmän herkin osa lämpenemiselle on käämien eristeaine, joka lämpenee jo pelkän staattorivirran vuoksi.

Moottorissa voimansiirto tapahtuu roottorin akselilta potkurin akselille kulmavaihteiston avulla. Vaihteiston välityssuhde on 1,94:1. Välityssuhde on yhdestä poikkeava siksi, että potkurin pyörimisnopeus pienenee. Moottorin pyörimisnopeudet ovat tyypillisesti tuhansia kierroksia minuutissa, ja hitaammin pyörivät koneet ovat kookkaampia kuin saman tehoiset nopeasti pyörivät.

Potkurista sen sijaan saadaan parhaat hyötysuhteet kasvattamalla potkurin halkaisijaa ja pienentämällä pyörimisnopeuksia muutamaan sataan. Näin ollen on tehty kompromissi moottorin koon ja potkurin halkaisijan välillä siten, että hyötysuhde on mahdollisimman hyvä, ja moottorin tilankulutus veneessä ei kasva liian suureksi.

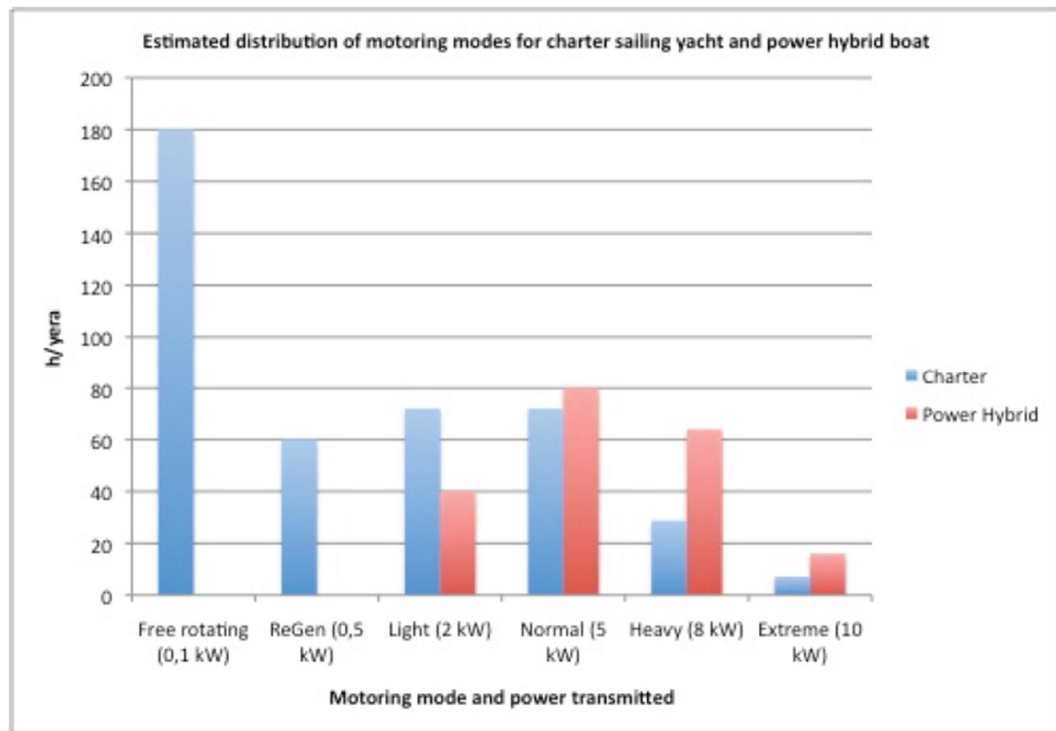
Välityssuhteeltaan muuttumatonta vaihteistoa käytetään, jotta säästytään tilaa vieviltä säädettäviltä vaihteistoilta ja uusilta mekaanisilta häviöiltä. Lisäksi moottorinohjaus on joka tapauksessa toteutettava esim. IGBT-suuntaajalla, koska moottori toimii ajoittain generaattorina. Näin ollen on yksinkertaisempaa rakentaa nopeussäätö taajuusmuuttajineen sähköisesti kuin mekaanisesti.

Kulmavaihteisto tarvitaan myös, koska moottori sijaitsee veneen pohjassa ja potkuri veneen alla osoittaen veneen perään päin. Näin ollen alaspäin osoittava roottori synnyttää väärän suuntaisen voiman, joka on käännettävä.

Konetta suunnitellaan hybridikäyttöön. Sen käyttöiäksi on arvioitu 5 000 tuntia. Kuvasta 19 (ks. seur. s.) nähdään käyttötuntien jakautuminen eri käyttötavoille. Kunkin teholuokan oikeanpuoleiset palkit ovat sähkö- ja dieselmoottoreiden hybridikäyttöä kuvaavia ja vasemmanpuoleiset palkit pelkän sähkömoottorin käyttöä kuvaavia.

Kuvasta nähdään, että suurin käyttöalue on tyhjäkäynti. Kuormituksen kasvaessa mukaan astuu dieselkone, sillä akusto ei yksinään kykene vastaamaan kaikesta kulutuksesta kovin pitkiä aikoja, etenkin suuremmilla kuormilla. Tämän työn mittaukset kuitenkin tehdään pelkkää sähkökäyttöä silmällä pitäen.





Kuva 19. Moottorin arvioitu käyttötapojen jakautuminen vuositasolla [41]

Potkurikäyrät kuvaavat sovelluksessa tarvittuja vääntömomentteja eri kierrosluvuilla. Käytettyjä termejä ovat esimerkiksi paalukäyrä ja avovesikäyrä. Paalukäyrä on se potkurikäyrä, joka leikkaa moottorin nimellismomentin kentänheikennysalueen rajalla. Käytännössä paalukäyrä kuvaa potkurin momentintarvetta jumitilanteissa eri kierrosnopeuksilla. Tällaisia jumitilanteita ovat esimerkiksi potkurin tarrautuminen verkkoon tai jäänmurtajan eteneminen vahvassa jäässä. Paalukäyrä saadaan aikaiseksi myös käynnistämällä potkurit rantaan kiinnitetyssä aluksessa.

Avovesikäyrä on se potkurikäyrä, joka syntyy ajettaessa nimensä mukaisesti avoveden tuottamalla vastamomentilla. Mitoituksissa moottorin tulee kyetä avovesikäyrän suuruisen jatkuvaan kuormitukseen.

#### 9.1.6 Jäähdytysjärjestelmä

Järjestelmässä on jäähdytys, jotta välttyttäisiin liialliselta lämpenemiseltä. Se on toteutettu moottorin akseliin kiinnitetyllä pumpulla, joka kiertää moottorin kierrosluvun tahdissa. Pumppu kierrättää voiteluöljyä vetolaitteen ja moottorin osien välillä. (Kuvia pumpusta, ks. liitteet 13 - 14.)

Öljy kulkee ylälaipan läpi, josta se johdetaan alalaippaan. Sen läpi kuljettuaan se johdetaan vetolaitteelle, jossa se virtaa alas kulmavaihteelle ja palaa takaisin ylös. Vetolaitteelta se pumpataan takaisin ylälaippaan. Vetolaitteen ollessa kokonaan vedenpinnan alapuolella öljyn on tarkoitus jäähtyä sitä ympäröivän veden avulla. (Ks. liite 15, PM -moottorin vetolaite.)

Testilaboratoriossa järjestely on hoidettava toisella tapaa, sillä vetolaitetta ei voida ympäröidä vedellä. Öljy kierrätetään systeemin sisällä ja sen lisäksi ulkoisen letkun avulla vettä sisältävään jäähdytysastiaan, jotta se ei lämpene jatkuvasti ja aiheuta ongelmia moottorissa. Jäähdytysastialla pyritään myös simuloimaan vetolaitteen ympärillä olevan veden jäähdyttävää vaikutusta. (Ks. liite 16, Öljykanavan ilmausastia.)

Vetolaite on valmistettu alumiinista, ja sen pinta-ala  $A$  on  $0,13 \text{ m}^2$ . Vesiastiassa oleva lämpöä luovuttava materiaali on halkaisijaltaan 12 mm paksua kupariputkea. Alumiinin lämmönsiirtokerroin  $h$  on  $250 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$ . Kuparilla vastaava luku on  $410 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$ . (Ks. liite 17, Kuparinen lämmönlvovuttaja.)

Jäähdytettävän kupariputken pituus  $l$  on se pituus, jolla kupariputki vastaa lämmönlvovutuskyvyltään vetolaitetta. Vastaavuus lasketaan yhtälön 8 avulla. Yhtälössä huomioidaan sekä alumiinin että kuparin lämmönlvovutuskykyjen välinen kerroin ja vetolaitteen pinta-ala. Yhtälön muuttuja  $d$  kuvaa kupariputken halkaisijaa.

$$l = \frac{A}{\pi \cdot d \cdot \frac{h_{\text{kupari}}}{h_{\text{alumiini}}}} = \frac{0,13 \text{ m}^2}{\pi \cdot 0,012 \text{ m} \cdot \frac{410 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2}{250 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2}} \approx 2,15 \text{ m} \quad (8)$$

Yhtälössä ei ole otettu huomioon sitä, että alumiinista rakennettu vetolaite on paksumpi rakenteeltaan, kuin kupariputki. Yhtälössä ei myöskään oteta kantaa siihen, että alumiininen vetolaite on maalattu, jotta se kestää suolapitoisessa merivedessä. Lisäksi järjestelmässä on noin 1,5 metriä kumiletkaa, jolla öljy johdetaan järjestelmän osasta toiseen. [42.]

Kaikki edellä mainitut tekijät ovat mukana luomassa mittausepävarmuuksia. Vaikkaan lämmönjohtavuus vetolaitteessa ja testissä käytössä olevassa letkussa eivät täysin vastaa toisiaan, saadaan silti viitteitä siitä, miten moottorin jäähdyttäminen vesiympäristössä onnistuu.

Avoim vesiasia testilaboratoriossa tarvitsee valuma-altaan, jotta tapaturman sattuessa jäähdytysvesi ei pääse valumaan lattialle. Koska öljy kierrätetään moottorin ulkopuolelle vesiasiaan, on myös se suojattava valuma-altaalla. Sen runko on rakennettu puusta ja vuorattu rakennusmuovilla. Vuototilanteissa valuma-altaan on tarkoitus toimia siten, että vesi jää rakenteen sisään. Pohjalle on asetettu noin senttimetrin paksuinen kumimatto. Sen tarkoituksena on ottaa vastaan moottoreista aiheutunut mekaaninen värinä ja siten suojata muovia repeämiltä.

#### 9.1.7 Kuormakone ja sen ohjaus

Vastamomenttia testissä tuottaa ABB M2BA 160 M 4-oikosulkumoottori. Kyseessä on kolmivaiheinen 400 V:n käyttöjännitteessä oleva 11 kW:n moottori. Moottoria ohjaa VACON-valmisteinen taajuusmuuttajayksikkö. Taajuusmuuttajan tyyppi on CPA-SA1A20000C3.

Ohjaus tapahtuu momenttisäätönä, eli järjestelmä tuottaa säädetyn vastamomentin mittauksen kohteena olevalle moottorille. Vastamomenttia tuottava kuormakone toimii generaattorina ja syöttää tuotetun energian takaisin sähköverkkoon. (Kuormakoneen kilpiarvot, kuva kuormakoneesta ja sen taajuusmuuttajayksiköstä, ks. liitteet 18 - 19.)

#### 9.1.8 Momenttianturi ja keskusyksikkö

Momenttianturi valvoo kuormakoneen tuottaman vastamomentin määrää. Arvo näkyy keskusyksiköstä, josta on myös säädettävissä moottorin kiertosuunta. Koska momenttianturin ja kestopagneettimoottorin välissä on 1:1:stä poikkeavalla välityssuhteella varustettu kulmavaihteisto, on huomioitavaa, ettei moottorin ohjauspuolella laskettu momentti ole sama kuin potkurin puolella. Tämä selittyy sillä, että sekä kuormakoneen että kestopagneettikoneen tuottama teho on samansuuruinen mutta erisuuntainen. Lisäksi näiden kahden koneen pyörimisnopeus on erisuuruinen. Teho on riippuvainen sekä momentista että nopeudesta. (Kuvat momenttianturista, sen keskusyksiköstä sekä momenttianturin ja testattavan moottorin välisestä liitoskappaleesta, ks. liitteet 20 - 23.)

## 9.2 Koestusmenetelmät

Työ tapahtuu pyörittämällä moottoria taulukon 2 osoittamilla kierrosnopeuksilla ja sää-  
tämällä sille edellä mainitun taulukon mukaisia vastamomentteja. Pyöritetään kullakin  
nopeudella, kunnes moottorin käämilämpötilan muutos on selkeästi tasaantunut, tai  
moottorin sisäosat lämpenevät liikaa. Testiajon todellinen kesto siis saattaa poiketa  
taulukossa 2 esitetystä testin oletettavasta kestosta.

Taulukko 2. Kuormituskokeiden nimellisarvoja

Testi	Akkuteho [kW]	Oletettu kesto [min]	Potkurin kier- rosluku [rpm]
Normaali kuorma	4,6	60	880
Normaali raskas kuor- ma	8	60	1140
Nimelliskuorma	9,9	60	1295

Oletusajat on saatu arvioimalla käyttötilanteen todellista kestoja. Mikäli oletusajat täyt-  
tyvät, konetta on siis mahdollista kuormittaa haluttu aika, vaikkei se kyseisellä teholla  
kykenisikään jatkuvaan käyttöön.

Yksittäisten mittausten välissä on pidettävä riittävän pitkä tauko, jotta kaikki moottorin  
osat ovat jäähtyneet huoneenlämpöön. Tämä pidentää yksittäisen testiajon kestoja,  
mutta sen avulla saadaan selvitettyä aika, jossa kone lämpiää kullakin teholla. Mikäli  
tydyttäisiin pelkkään maksimilämpenemän arvoon, riittäisi testissä se, että aloitetta-  
isiin mahdollisimman korkeista alkulämpötiloista kuormittamaan konetta.

Mittaukset suoritetaan seuraavia työvaiheita noudattaen:

### 1. Valmistelevat työvaiheet

- a. Rakennetaan jäähdytysjärjestelmän vuotoallas.
- b. Kytetään kuormakone, momenttianturi, mittalaitteisto ja testattava  
moottori oheislaitteistoihin yhteen kytkentäkaavion mukaisesti (ks. ku-  
va 16, s. 29).
- c. Kytetään kuormakoneen moottorinohjaimen virtaliitin voimapistora-  
siin.

- d. Valitaan jarruttava ajotapa kuormakoneen keskimmäisen moottorinohjaimen parametrilla P2.6.1 *Motor Control Mode* (jarruttava ajotapa on *OL TorqCtrl*, pyörittävä *Freq Control*).
- e. Ajotapa täytyy valita myös toisella parametrilla P2.4.6 *Start function* (jarruttava ajotapa on *Flying start*, pyörittävä *Ramping*).
- f. Moottorin pyörimissuunta katsotaan koneen perästä ja valitaan parametrilla P3.3 *Keypad direction* (myötäpäivään on *forward*, vastapäivään *reverse*).
- g. Pyörimissuunta on valittava myös momenttianturista vipukytöntä kääntämällä, suunta katsotaan momenttianturissa olevien nuolien suunnasta, voimakoneen puolelta.
- h. Valitaan vielä pyörimissuunta momenttianturin keskusyksiköltä painamalla näppäinsarja *DET SET, ENTER, ENTER, (1: INT CW myötäpäivään tai 2: INT CCW vastapäivään), ENTER, EXIT, EXIT, EXIT*.
- i. Käännetään moottorinohjaimen potentiometri ääriasentoonsa vastapäivään, jotta kuorma on minimissään koneen kytkeytyessä päälle.

## 2. Testiajot

- a. Kytetään akuston ylikuormitussuoja päälle.
- b. Kirjataan mitattavat arvot ennen kuormituksen aloittamista.
- c. Käynnistetään moottorinohjausyksiköstä moottori, aloitetaan ajanotto ja säädetään nopeus noin 300 - 400 kierrosta minuutissa.
- d. Nostetaan vuoroin nopeutta ja vuoroin vastamomenttia. Vastamomentti säädetään painamalla kuormakoneen ohjausyksiköstä *START* ja säädetään haluttu momentti tasaisesti potentiometrillä pyörittämällä.
- e. Kun nopeus ja vastamomentti on säädetty, kirjataan viiden minuutin välein mittaustulokset ylös.
- f. Kun akuston varausaste alittaa 50 Ah, tai kun mittausta on suoritettu loppuun, ajetaan järjestelmä alas seuraavan kirjauksen jälkeen.
- g. Nollataan kuormakoneen tuottama momentti palauttamalla sen ohjausyksikön potentiometri ääriasentoon vastapäivään ja painetaan *STOP*-painiketta.
- h. Tehdään tulkinnat mittaustuloksista ja valitaan seuraava testitapa.
- i. Kytetään DC-teholähde päälle, jotta akuston lataus käynnistyy.
- j. Odotetaan, että moottori jäähtyy huoneenlämpöön.

- k. Odotetaan, että akusto on varautunut riittävän täyteen seuraavaa koetta varten.
- l. Palataan kohtaan 2b ja suoritetaan mittaukset seuraavalla kierrosluvulla ja vastamomentilla.
- m. Kun kaikki mittaukset on suoritettu, kytketään akuston ylikuormitussuoja pois päältä.

## 10 Koetulokset

### 10.1 Ensimmäisen puoliteholla suoritettujen koestusten esittely

Ensimmäiset käytännön mittaukset saatiin suoritettua 25.3.2011. Kokeessa pyrittiin alustavasti selvittämään miten laitteisto reagoi pitempiaikaisiin kuormituksiin, joita koneella ei aiemmin ollut suoritettu. Koska koneella ei pidempiaikaisia kokeita aiemmin ole tehty, oli syytä aloittaa vajaateholla.

Haasteita tuottivat muun muassa kuormakoneen säätimen ohjauksen taso. Valittu taso oli 0–50 % kuormakoneen nimellisarvoista, joten kuormakoneesta ei ennen ensimmäistä onnistunutta mittausta saatu irti täyttä tehoa tai riittävän suurta kuormitusta mittauksen suorittamiseksi. Ongelma kuitenkin ratkesi sillä, että säätöarvoja vaihtoi välille 0–100 %.

Toinen ongelma tuli vastaan akuston laturin hyytyessä moottorin kuormitustilanteissa. Kuorman muutokset aiheuttivat kapasiteetiltaan varsin rajallisessa tehonsyöttöjärjestelmässä jännitteenaleneman, johon moottorinohjain reagoi hätäpysäytyksellä. Ratkaisu tähän löytyi siitä, että kytki laturin irti laitteistosta mittausten ajaksi. Akuston kyky reagoida kuormitustilanteiden muutoksiin oli siis laturia parempi.

Moottorinohjaimen on tarkoitus mitata moottorin käämien lämpötila-anturin resistanssi ja laskea sen perusteella moottorin käämien lämpötila. Tämä ei kuitenkaan onnistunut, sillä moottorinohjainpiirissä havaittiin sisäinen resistanssi, joka vääristi vastusarvoa. Tästä syystä moottorinohjain luuli, että moottorin lämpötila on yli sallitun, joka johti käytön automaattiseen estämiseen. Moottorinohjaimen lämpötilamittauspinnien väliin

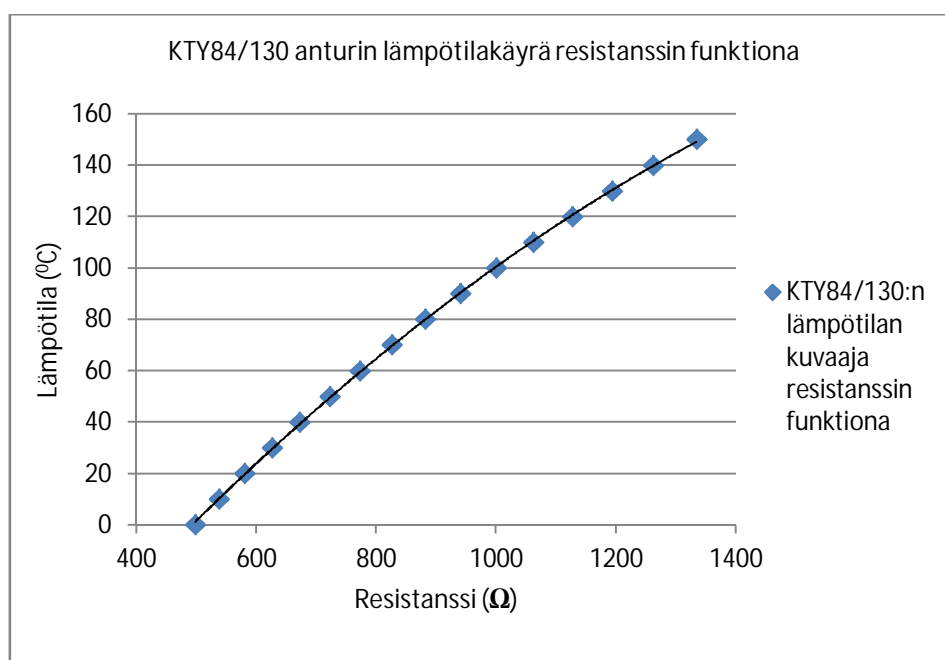
laitetun 500 ohmin vastuksen myötä moottorinohjaimen lämpötilasta aiheutuva hätäseis-toiminto saatiin poiskytkettyä.

Vaikka akustoa voi kuormittaa, kunnes kapasiteetti on 40–50 Ah, mittaus oli kuitenkin lopetettava ennen aikojaan. Tämä johtui siitä, että käämilämpötila nousi äkillisesti viimeisessä mittauksessa.

Taulukko 3. Mittaustulokset 25.3.2011

t [min]	nmoot [rpm]	npotk [rpm]	Mpotk [Nm]	Cakku [Ah]	U [V]	I [A]	Ts [°C]	Rmoot [Ω]	Tv [°C]	Töm [°C]	Töv [°C]
0	0	0	0	138,3	53		34	642	22,2	20,3	20,7
3,3	1696		40,2								
5	1696	875,5	40,2	131,3	50,3	91,5	40	695	23,9	19,5	20,7
10	1696	875,5	40,2	125,2	50,3	92	40	740	23,5	20,3	23,3
15	1696	875,6	40,2	118,1	51	92	40	790	21,5	20,5	28,8
20	1696	875,6	40,2	110,9	51	91,5	41	810	21,5	20,7	30,5
25	1696	875,6	40,2	102,7	51	92	42	846	21,6	20,7	32
30	1696	875,6	40,2	95	50	92	42	878	21,5	20,1	34,3
35	1696	875,6	40,3	86,9	50	93	42	914			37
40	1696	875,6	40,3	79,9	50	93,5	42	1034	21,5		39,6

Käämin lämpötila mitattiin resistanssimittarilla. Taulukon 3 vastusarvosta  $R_{moot}$  päätettiin todellinen lämpötila lämpötila-anturin datalehdessä (ks. liite 12, KTY84 -anturien vastusarvotaulukko.) Liitteestä löytyvien likiarvojen perusteella piirrettiin kuvaaja likiarvojen ja niitä vastaavien lämpötilojen arvoista (ks. kuva 20).



Kuva 20. KTY84/130-anturin lämpötilan kuvaaja resistanssin funktiona

Moottorin käyntinopeus ja kuorman suuruus nostettiin nimelliseensä 3,3 minuutissa. Taulukossa 3 (ks. s. 42) esiintyvät  $n_{moot}$  kuvaa moottorin kierroslukua,  $n_{potk}$  kuormakoneen kierroslukua,  $M_{potk}$  kuormakoneen vastamomenttia,  $C_{akku}$  akun varaustilannetta ja  $T_s$  moottorinohjaimen lämpötilaa.  $T_v$  ilmaisee jäähdytysveden lämpötilan,  $T_{ov}$  moottorilta jäähdytykselle tulevan öljyn lämpötilaa ja  $T_{om}$  jäähdytykseltä moottorille kulkevan öljyn lämpötilaa.

Mittaustuloksista havaitaan, että moottorinohjain ja akusto kykenevät ylläpitämään vakionopeuden ja -momentin. Moottorinohjaimen lämpötila pysyi noin 40 °C:n tasolla. Moottorinohjaimen tuuletus käynnistyy automaattisesti, kun sen lämpötila saavuttaa 40 °C.

Mittauksessa jäähdytysastialta moottorille kulkevan öljyn lämpötilaa mitattiin öljykana-  
van väliin kiinnitetyn kupariputken pinnasta. Mittauksessa öljyn lämpötila ei muuttunut merkittävästi, vaikka jäähdytysastiaan saapuvan öljyn lämpötila kasvoikin rajusti. Tämän lisäksi lämpötilan lukemat vaihtelivat epäjohdonmukaisesti riippumatta jäähdytysastialle tulevan öljyn lämpötilasta ja olivat jopa jäähdyttävän veden lämpötilaa alempia. Tästä seurasi johtopäätös, että öljyä on syytä mitata joko suoraan putkiston sisällä, kuten jäähdytykseen kulkevaa öljyä, tai muutoin tarkemmalla menetelmällä.

Mittaustulosten perusteella laskettiin taulukossa 4 (ks. seur. s.) esitetyt moottorin akselille syötetty hyötyteho  $P_{potk}$ , koko järjestelmälle akustolta syötetty teho  $P_{in}$  ja järjestelmän kokonaishyötysuhde yhtälöiden 1, 3 ja 9 avulla (ks. s.17). Kuvasta 20 (ks. s. 42) katsottiin likiarvo moottorin käämien lämpötilalle kullakin resistanssin arvolla, joka myös lisättiin taulukkoon 4.

$$P_{potk} = 2\pi * M_{potk} * \frac{n_{potk}}{60} \quad (9)$$

Taulukon 4 arvoista nähdään, että järjestelmän tehonkulutus, tehontuotanto ja hyötysuhde pysyvät jokseenkin vakiona. Moottorin lämpötila kasvaa verrattain korkealle, kun otetaan huomioon, että koneen on tarkoitus kestää 145 °C:n lämpötiloja, ja konetta kuormitettiin noin puolella nimellistehosta. Taulukon arvojen perusteella piirrettiin moottorin lämpenemäkäyrä (ks. kuva 21).

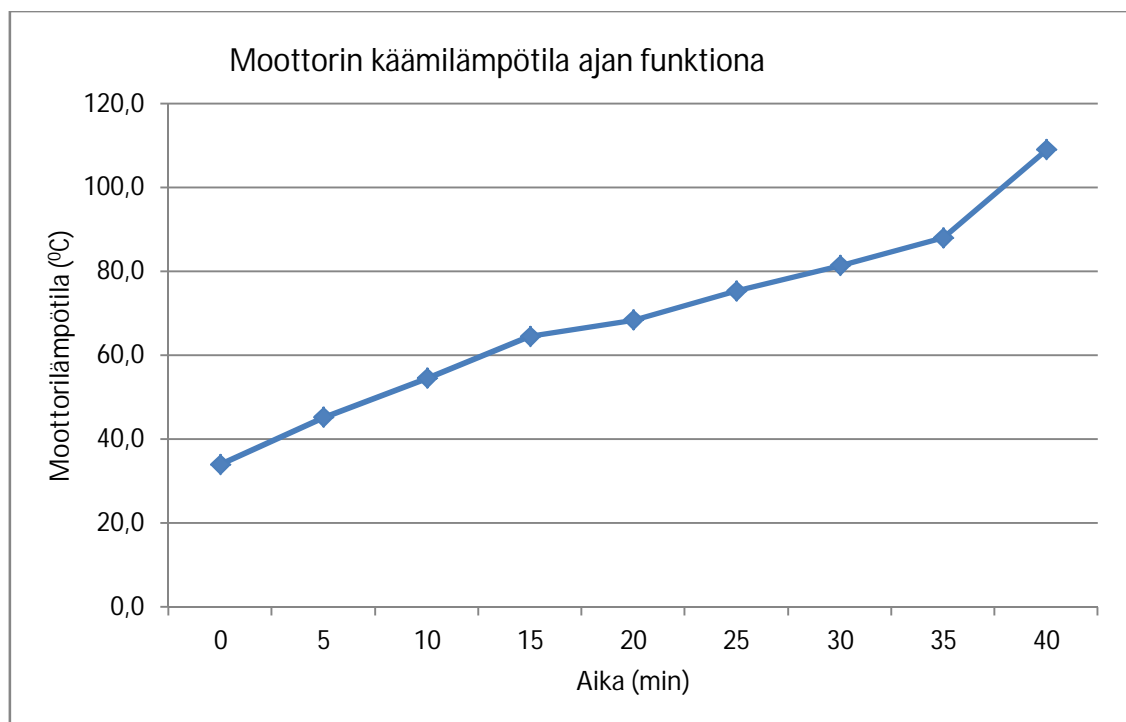


Taulukko 4. Taulukon 3 perusteella lasketut arvot

t [min]	P <sub>potk</sub> [W]	P <sub>in</sub> [W]	T <sub>moot</sub> [°C]	Hyötysuhde
0	0	0	34	
3,3	0	0		
5	3685,6	4602	45,2	0,8
10	3685,6	4628	54,5	0,8
15	3686,0	4692	64,5	0,79
20	3686,0	4667	68,4	0,79
25	3686,0	4692	75,3	0,79
30	3686,0	4600	81,4	0,8
35	3695,2	4650	88	0,79
40	3695,2	4675	109	0,79

Silmämääräinen tarkastelu mittauksissa osoitti, että öljyn virtausnopeus heikkeni testin edetessä. Samaa voidaan päätellä siitä, että syötetyn sähkötehon suuruus ei kasvanut, mutta silti testin lopussa moottorin lämpenemä poikkesi tyypillisen lämpenemiskäyrän muodosta.

Kun kuormitusteho pysyy vakiona, mutta lämpenemä kiihtyy, on todennäköistä, että jäähdytysjärjestelmä on vioittunut. Tästä olettamuksesta seurasi johtopäätös, että akselille liimatun pumpun liimaus on pettänyt lämpimissä olosuhteissa.



Kuva 21. Moottorin lämpenemäkäyrä

Mittauksiin pyrittiin saamaan automaattinen lämpötilanmittaus, mutta laitteiston hankintaan ja käyttöönottoon liittyvien viiveiden vuoksi arvot piti suoritetuissa mittauksissa ottaa ylös käsin. Moottorin lämpötilaa indikoivasta kuvaajasta kuitenkin on nähtävissä selkeitä suunnanmuutoksia. Tämän vuoksi seuraavissa mittauksissa arvojen ylösoton sykliä tiennetään viidestä kolmeen minuuttiin.

## 10.2 Puoliteholla koestamisen toistaminen

Jäähdytysjärjestelmän pettämisen jälkeen moottori purettiin. Kävi ilmi, että pumpun liimaus todella oli pettänyt. Pumppu kiinnitettiin uudelleen kiinni, tällä kertaa ruuvilla akselille porattuun reikään.

Koska ensimmäinen koestus oli vaurioittanut järjestelmää, ongelman korjaamisen jälkeen se oli syytä toistaa. Teholuokka pidettiin siis 4,6 kW:n tasolla. Toinen koestus suoritettiin 29.3.2011.

Jäähdytysvesiastian lisättiin pumppu kierrättämään jäähdytysvettä, jotta lämmin vesi ei kerääntyisi astian pintaan ja vääristäisi veden lämpötilan mittaustuloksia. Koska jäähdytysveden lämpötilan tasaisuus eri osissa astiaa paranee pumpun ansiosta, lisättiin tulevissa testeissä astiaan jäätä sitomaan lämpöä, jota moottorin jäähdytysöljy veteen luovuttaa. Tällä pyritään pitämään jäähdytysvesi mahdollisimman tasaisena ja tulokset siten helppolukuisena. (Ks. liite 24, Vedensekoittaja.)

Lisäksi pyrittiin parantamaan jäähdytykseltä tulevan öljyn huonoa lämpötilanmittausta. Kullakin mittaushetkellä tarkistettiin, ettei anturi moottorin tärinän vuoksi ollut irronnut mittauspisteestä, eli että anturi todella oli kosketuksissa kupariputkeen, josta lämpö mitattiin.

Mittaustuloksista taulukossa 5 (ks. seur. s.) nähdään, että jäähdytysöljyn lämpötila jäähdytysveden jälkeen kasvaa moottorin lämmitessä. Tämä osoittaa, että 25.3.2011 suoritetussa mittauksessa saadut  $T_{om}$ :n arvot olivat oletusten mukaisesti virheellisiä (ks. luku 10.1, s. 41 - 45). Toisin sanoen jäähdytyksen jälkeisessä öljynkiertojärjestelmän osassa olevaa mittausta oli syytä tarkentaa.

Taulukko 5. Mittaustulokset 29.3.2011; nmoot=1696 rpm, npotk=875,6 rpm ja Mpotk= 39,8

Nm

t [min]	Cakku [Ah]	U [V]	I [A]	Ts [°C]	Rmoot [Ω]	Tv [°C]	Töm [°C]	Töv [°C]
0	137,1			33	599	16	20,3	20,5
3	134,9	51	91,5	36	619	17	19	21,1
6	130	51	91,5	40	657	16,5	19,3	23,5
9	126,2	51	91,5	40	691	16,5	20,1	25,5
12	121,6	51	91,5	40	717	16,4	20,6	26,5
15	117,1	51	91,5	40	743	16	22,1	30,7
18	112,6	51	91,5	41	769	16,7	23,3	34,2
21	108	51	91,5	41	792	15,5	24,5	37
24	103,3	51	91,5	42	811	16	25,9	40,2
27	98,7	51	92,5	41	839	15,5	27,5	42
30	94,1	51	92	42	861	16,4	28,8	43,9
33	89,5	51	92,5	42	879	17,8	30,1	46,2
36	84,9	51	93	42	921	18,4	31	47,3
39	79,9	51	93	43	940	17,7	32	49
42	75,6	51	93	43	953	16,8	32,6	50,3
45	70,5	50	93,5	43	968	17,1	32,6	51,8
48	66,3	50	93,5	43	992	17,2	32,2	53
51	61,5	50	93,5	43	1009	17,4	32,7	54,3
54	56,9	50	93,5	43	1020	17,7	33,6	55,4
57	52,3	50	94	43	1028	18,3	33,1	56,3
60	47,5	50	94,5	43	1036	17,9	33,5	57,2

Taulukon 6 (ks. seur. s.) arvoista nähdään, että mittaus vastaa kuormituksen osalta 25.3.2011 suoritettua mittauksia. Moottorin lämpeneminen mittauksen lopussa sen sijaan hidastui pumpun kiinnityksen parantuessa.

Vaikka jäähdytysöljyn lämpötila kasvoi koko mittauksen ajan, on se silti merkittävästi moottorin käämien lämpötilan alapuolella. Tästä seurasi päätelmä, että moottorin rakenne on sisältä sellainen, etteivät käämit luovuta tarpeeksi lämpöä öljykanavaan. Tilanne voisi johtaa vakavaan käämien yllälämpenemiseen, jopa koneen toimiessa vajaa-teholla.

Mittaukset eivät kuitenkaan yksiselitteisesti tätä vielä todista, ja pidempiaikaisia mittauksia sekä mittauksia suuremmilla kuormitustehoilla oli syytä tehdä. Mikäli tulevat mittaukset kuitenkin osoittavat, että moottorin rakenteessa on lämmönsiirtoon liittyviä ongelmia, on moottoriin tehtäviä rakenteellisia muutoksia harkittava.

25.3.2011 saatujen mittaustulosten, sekä taulukon 6 (ks. seur. s.) lämpötila-arvojen avulla piirretään lämpenemäkäyrät kuvaan 22 (ks. s. 48). Kuvasta 22 nähdään, että

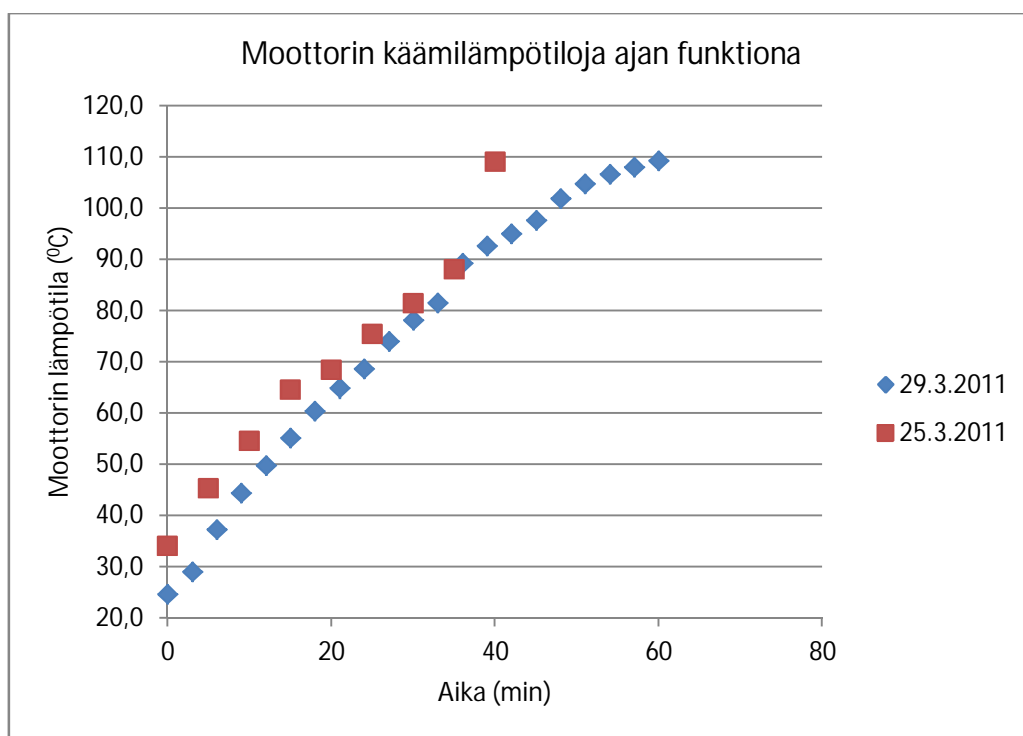
moottorin käämin lämpötilan käyttäytyminen eri mittauskerroilla oli varsin samanlaista. Käynnistyksen ja kuorman ylösajon eriaikaisuus vaikuttanee alussa oleviin poikkeamiin. Pumpun uudelleenkiinnityksen ansiosta 29.3.2011 saadut arvot mukailevat tyypillisen lämpenemiskäyrän muotoa 40:n minuutin testiajon jälkeenkin.

Taulukko 6. Taulukon 5 arvojen perusteella lasketut arvot

Aika [min]	Ppotk [W]	Pin [W]	Tmoot [°C]	Hyötysuhde
0	0	0	24,7	
3	3657	4666,5	29,1	0,78
6	3649	4666,5	37,2	0,78
9	3649	4666,5	44,4	0,78
12	3649	4666,5	49,8	0,78
15	3649	4666,5	55,1	0,78
18	3649	4666,5	60,3	0,78
21	3649	4666,5	64,9	0,78
24	3649	4666,5	68,6	0,78
27	3649	4717,5	74,0	0,77
30	3649	4692	78,2	0,78
33	3649	4717,5	81,6	0,77
36	3649	4743	89,3	0,77
39	3649	4743	92,7	0,77
42	3649	4743	95,0	0,77
45	3649	4675	97,7	0,78
48	3649	4675	101,9	0,78
51	3649	4675	104,8	0,78
54	3659	4675	106,6	0,78
57	3659	4700	108,0	0,78
60	3659	4725	109,3	0,77

Käämin lämpenemiskäyrä on molemmissa mittauksissa silti nouseva. Tämä tarkoittaa sitä, että testikäytössä olevan akuston kapasiteetti ei riitä riittävän pituiseen ajoon, jolloin lopullinen lämpenemä saavutettaisiin. Koska loppukäyttäjällä voi kuitenkin olla käytössään kapasiteetiltaan suurempia akustoja, on järjestelmän toimivuus pitemmilläkin ajoilla varmistettava.

Koska testi tehtiin noin puolella nimellistehosta, ja moottorin käämit jatkoivat silti lämpenemistä 110 °C:n kohdalla, on syytä olettaa että ne täydellä teholla lähestyvät 145 °C:n ylärajaa, tai jopa ylittävät sen. Tätä lämpötilaa ei tule saavuttaa, jotta moottorin elinikä ei tippuisi liikaa. Lisäksi öljyn virtaus silmämääräisen tarkastelun perusteella näytti melko pieneltä ja siihen liittyviä jatkotutkimuksia oli syytä tehdä.



Kuva 22. Käämilämpötilojen kehitys ajan funktiona

Tuloksista on pääteltävissä, että joko järjestelmän virtausnopeus ei riitä suurilla kuormilla, jolloin järjestelmän pumppaustehoa on kasvatettava. Toinen syy lämpenemisongelmaan voi olla se, että vetolaitteen lämmönluovutuskyky ei nimellisteholla riitä, jolloin jäähdytyspinta-alaa järjestelmässä on syytä kasvattaa.

Testilaitteiston rajoittuneisuuden vuoksi täyden tehon testiä ei ollut mahdollista sillä hetkellä suorittaa, joten seuraavassa vaiheessa oli syytä testata pumppaustehon muutoksen vaikutusta lämpenemiseen käytännössä. Tätä varten oli oleellista selvittää tieto virtausnopeuksista.

### 10.3 Mittausmenetelmien tarkastelua ja kehittämistä

Koska mittauksien tulosten arvioinnissa esiintyi paljon epävarmuustekijöitä, oli mittausmenetelmiä kehiteltävä ennen varsinaisten mittausten jatkamista. Tämä suoritettiin 31.3.2011.

Aiemmissa mittauksissa kohdattiin lämpöantureiden antamien arvojen epätarkkuus. Ollessaan nesteessä anturin lämpeneminen on johdonmukaista, kun sitä verrataan ympäristön lämpötilan muutoksiin.

Öljyn lämpötilanmittaus jäähdytysastian jälkeen antoi aiemmissa mittauksissa epäuskottavia arvoja. Tähän syynä voi olla se, että anturi on suurimmaksi osaksi huoneilmassa, joka on mitattavaa öljyä viileämpää. Toinen syy voi olla se, että kuparinpätkä, josta lämpötila mitataan, luovuttaa lämpöä ympäristöönsä sekä pysyy näin ollen viileämpänä, kuin sen sisällä kulkeva öljy.

Ongelma ratkaistiin piirasvan ja eristemuovin avulla. Anturin pään ollessa kiinni kupariputkessa, se ympäröidään piirasvalla, joka on parempi lämmönjohdin kuin ilma. Tämä aiheutti sen, että anturi ei enää jäähtynyt ilman vaikutuksesta, vaan kupariputkesta vapautuva lämpö johtui piirasvaa pitkin anturille joka suunnasta tehokkaammin.

Eristemuovi kiedottiin kupariputken ja anturin ympärille, jotta kupariputkesta ympäristöön vapautuva lämpö jäisi suljettuun tilaan, ja näin ollen kupariputken todellinen lämpötila pysyisi lähellä sen sisällä kiertävän öljyn lämpötilaa.

### 10.3.1 Virtausnopeuden tutkiminen

Virtausnopeuksien selvittämiseksi järjestelmään hankittiin saksalaisen Dr. Siebert & Kühn GmbH nimisen yrityksen valmistama SiKa VUS10-mallinen ultraäänivirtausmittari. Vetolaitteen ja käytössä olleen kupariputken jäähdytystehojen samankaltaisuuden todentamiseksi hankittiin 700 W:n lämpövastus, jolla Oceanvolt on jo aiemmin lämmitänyt vetolaitteessa kiertävää öljyä jäähdytystestin suorittamiseksi. Virtausnopeuden merkityksen todentamiseksi hankittiin vielä ulkoinen 12 V:n tasajännitteellä toimiva pumppu, jonka avulla virtausnopeuden säädettävyyttä mahdollistettiin. (Ks. liite 25, Ulkoinen öljypumppu.)

VUS10 osoittautui mittauksissa erittäin tarkaksi veden virtausnopeusmittariksi, mutta liitettäessä se öljyä sisältävään järjestelmään, se ei enää antanut minkäänlaisia arvoja. Tästä syystä virtausnopeutta oli arvioitava uudella menetelmällä. Ulkoisen pumpun avulla pumpattiin öljyä puoli litraa mitta-astiaan. Virtauksen kestosta otettiin aika. Taulukossa 7 (ks. seur. s.) kuvataan virtausmittauksen tulokset. Taulukossa  $V$  on mitta-astiaan pumpatun öljyn määrä,  $t$  pumppauksessa kestänyt aika ja  $v$  siitä yhtälön 10 avulla (ks. seur. s.) saatu virtausnopeus.

Taulukko 7. Virtausnopeusmittauksen tulokset

U [V]	V [l]	t [s]	v [l/min]
6,5	0,5	8,7	3,4
8	0,5	6	5,0
10	0,5	n. 4,8	n. 6,3

$$v = \frac{V \cdot 60^S / min}{t} \quad (10)$$

Silmämääräinen tarkastelu virtausnopeuksista osoitti, että jopa 3,4 l/min virtausnopeus oli merkittävästi suurempi kuin moottorin oman pumpun aiheuttama virtausnopeus. Taulukon 7 tulokset eivät huomioi moottoriin kytkettynä olevan pitemmän putkiston aiheuttamia virtaushäviöitä.

Mittauksen epätarkkuuksia lisäsi reaktioaika ajanotossa. Tulokset myös saattavat muuttua öljyn notkistuessa, sen lämmettyä. Lisäksi tuloksissa ei ole huomioitu moottorin oman pumpun aiheuttamaa virtausta lämpenemiskokeissa. Näiden tulosten avulla kuitenkin päästään suuruusluokkaan siitä, millaisia virtausnopeuksia tulevaisissa testeissä on käytössä, sillä tarkkaa mittalaitetta mittauksiin ei ollut saatavissa.

### 10.3.2 Lämmönluovutuskyvyn todentaminen käytännön kokeella

Ulkoisen pumpun, lämmitysvastuksen ja jäähdyttävän kupariputken avulla suoritettiin koe, jossa testattiin, vastaako kupariputken jäähdytysteho suuruusluokaltaan vetolaitteen jäähdytystehoa. Oceanvoltin aiemmat testit moottorilla sisälsivät tietoa saman 700 W:n lämpövastuksen aiheuttamista lämpötilanmuutoksista vetolaitteessa. Mikäli kupariputkiston lämmönluovutuskyky todella vastaa vetolaitteen lämmönluovutuskykyä, 700 W:n lämpötehon tulisi tuottaa samansuuruinen lämpötilanmuutos kupariputkistossa. (Ks. liite 26, 700 W:n lämpövastus.)

Mittausta varten rakennettiin järjestelmä, jossa öljy kiersi pumpun läpi jäähdytysvesias-  
tiassa sijaitsevaan 2,15 metriä pitkään kupariputkistoon ja sieltä lämmitysvastuksen  
kautta takaisin pumpulle. Mittauksessa pyrittiin samoihin olosuhteisiin Oceanvoltin mit-  
tauksien kanssa, jossa tutkittiin vetolaitteen lämmönluovutuskykyä.

Taulukossa 8 esiintyvien mittaustulosten avulla piirrettiin Kuva 23 (ks. seur. s.), jossa vertailtiin testituloksia. Vertailukohteena käytettiin Oceanvoltin mittaustuloksia testissä,

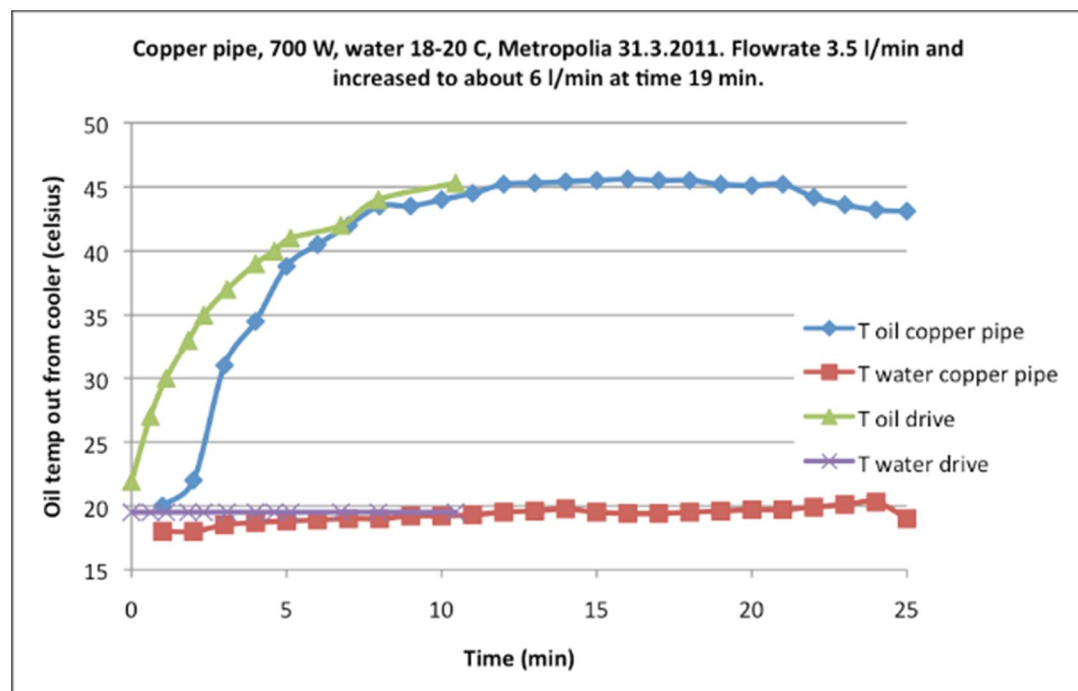
jossa mitattiin vetolaitteen jäähdytysöljyn lämpenemistä 700 W:n vastuksen avulla. Öljyn lämpötila on molemmissa testeissä mitattu järjestelmän siitä osasta, jossa öljy on virtaamassa lämmitysvastukselle ja on jo virrannut jäähdytysveden lävitse.

Taulukko 8. Lämmönluovutuskokeen testitulokset

t [min]	Töljy [°C]	Tvesi [°C]	
0	20	18	
1	22	18	
2	31	18,5	
3	34,5	18,7	
4	38,8	18,8	
5	40,5	18,9	
6	42	19	
7	43,5	19	
8	43,5	19,2	
9	44,5	19,2	
10	45,2	19,3	
11	45,3	19,5	

t [min]	Töljy [°C]	Tvesi [°C]	Kommentit
13	45,5	19,76	Jäähdytysvettä lisättiin
14	45,6	19,5	
15	45,5	19,4	
16	45,5	19,4	
17	45,5	19,5	
18	45,2	19,6	
19	45,1	19,7	v = 6 l/min
20	45,2	19,7	
21	44,2	19,9	
22	43,6	20,1	
23	43,2	20,3	
24	43,1	19	

Kuvasta 23 voidaan havaita, että lämpövastuksen aiheuttama lämpenemä on jokseenkin sama jäähdytyselémentin ollessa vetolaite, tai 2,15 metrin kupariputki. Jäähdytyselémenttiä jäähdyttävän veden lämpötila oli mittauksissa lähellä toisiaan. Tämä osoittaa, että laskelmat kupariputken pituudesta ovat oikein (ks. luku 9.1.6, s. 36 - 38).



Kuva 23. Vetolaitteen ja kupariputken lämpeneminen 700 W:n vastuksen avulla



Öljyn lämpötilan tasaantuessa mittauksissa samalle 45 °C:n tasolle voidaan todeta, että vetolaite ja kupariputki siis luovuttavat lämpöä noin 700 W:n teholla. Tätä voitaisiin hyödyntää hyötysuhteiden tarkastelussa, mikäli virtausnopeudesta saataisiin täsmällisiä tietoja.

Kupariputken lämmettyä 19 minuuttia, pumpun tehoa nostettiin siten, että virtausnopeus kasvoi arvosta 3,5 l/min arvoon 6 l/min. Tämä aiheutti selkeästi nähtävissä olevan muutoksen lämpenemässä. Öljyn lämpötila jäähdyi noin 2,5 °C:lla. Tämä todistaa, että jäähdytysaineen virtausnopeus vaikuttaa jäähdytyksen onnistumiseen.

### 10.3.3 Lämpöanturin sijoittaminen moottorin ylälaippaan

On selvää, ettei öljy moottorin ja vetolaitteen läpi nopeasti kiertäessään ehdi lämmetä samalle tasolle, kuin sen ympäristössä vallitseva lämpötila on. Tästä syystä lämmön siirtymistä käämeiltä moottorin ulompiin rakenteisiin selvittäessä, oli mitattava rakenteiden lämpötila itsessään.

Tämä toteutettiin lämpötila-anturilla, joka sijoitettiin moottorin ylälaippaan lähelle öljykanavaa. Laippaan porattiin reikä kanaviston väliin ja sen sisälle asennettiin anturi. (Ks. liite 27, Laippa-anturi.)

## 10.4 Pumppaustehon merkityksen tarkastelua koestuksessa

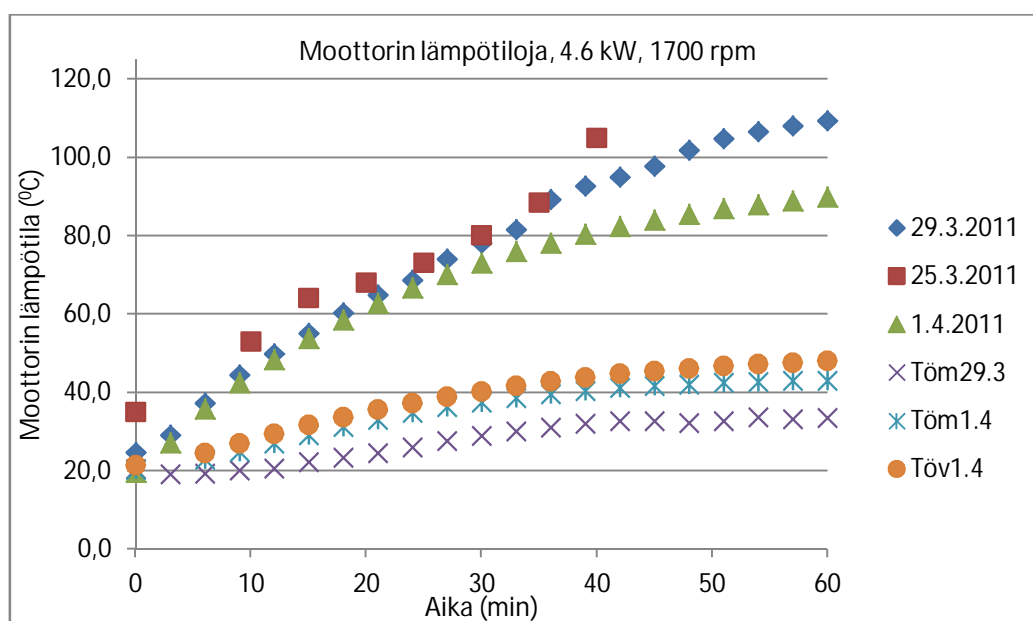
Mittausmenetelmien kehittymisen jälkeen varsinaisia mittauksia oli syytä jatkaa. Toiminnan nopeuttamiseksi seuraavassa mittauksessa tarkasteltiin lämpenemisen lisäksi pumppaustehon vaikutusta lämpenemiseen. Lisäksi tarkasteltiin moottorin eri osien välisiä lämpötilaeroja käämien lämmönluovutuskyvyn varmistamiseksi. Kuormitusteho pidettiin yhä 4,6 kW:n tasolla, jotta saataisiin aiempiin mittauksiin nähden vertailukelpoista aineistoa. Koestus suoritettiin 1.4.2011.

Mittaustuloksissa esiintyvä  $T_l$  kuvaa laipasta mitattua lämpötilaa. Testiä jatkettiin kuormituksen jälkeen 15 minuutin ajan. Sillä pyrittiin selvittämään, miten nopeasti laippa lämpenee samalle tasolle käämien lämpötilan kanssa, eli kuinka hyvin käämit luovuttavat lämpöään moottorin muihin osiin. (Ks. liite 28, Mittaustulokset 1.4.2011.)

Testijärjestelmän alasajon vuoksi moottorin lämpötilaa 63 minuutin kohdalla ei kyetty ottamaan. Ulkoinen pumppu sammutettiin noin 61 minuutin testiajon jälkeen. Tämä aiheutti laipan ja käämien voimakkaan jäähtymisen ensimmäisen minuutin aikana moottorin sammuttamisen jälkeen.

Mittaustulosten perusteella laskettiin järjestelmään syötetyn tehon, siitä saadun tehon arvot sekä järjestelmän kokonaishyötysuhde ja moottorin käämien lämpötila (ks. liite 29, Tuloksista lasketut arvot 1.4.2011). Lämpenemäkokeissa saaduista käämien lämpötilan mittaustuloksista piirretään kuvassa 24 esiintyvä kuvaaja. Jäähdytetyn öljyn mittaustarkkuuden analysoimiseksi lisätään sen mittaustulokset kuvaajaan. Moottorilta tulevan ja moottorille lähtevän öljyn lämpötilaerojen analysoimiseksi lisätään kuvaajaan moottorille jäähdytykseltä menevän öljyn lämpötilamittauksen arvot.

Kuvasta 24 nähdään, kuinka ulkoisen pumpun lisääminen mittauksiin aiheuttaa pienemmän lämpenemän. Lisäksi piirasvan vaikutus anturin päässä näkyy selkeästi.



Kuva 24. Lämpenemä 4,6 kW kuormituskokeissa ja piirasvan vaikutus;  $T_{om}$  kuvaa moottorille johdetun öljyn lämpötilaa

Vaikka lämpeneminen on hitaampaa 1.4.2011 suoritetuissa mittauksissa, moottorille johdetun öljyn lämpötila näyttäisi silti olevan korkeampi. Tämä johtuu mittaustarkkuuden merkittävästä parantumisesta.

Jotta voitaisiin arvioida öljyputken pinnalta mitatun lämpötilan oikeellisuutta, vertaillaan sen arvoja öljyssä olevan anturin arvoihin, koska siinä ympäristötekijöiden vaikutus mittaustarkkuuteen on häviävän pieni. Jäähdytykselle menevän öljyn lämpötilan on oltava suurempi, kuin jäähdytykseltä lähtevän öljyn lämpötila. 1.4.2011 suoritettujen öljyn lämpötilaan liittyvien mittausten perusteella nähdään kuvasta 24 (ks. s. 53), että näin tosiaan on. Jäähdytykselle menevän öljyn lämpötila on muutaman asteen lämpimämpi kuin jäähdytykseltä lähtevän öljyn. Tämä viittaa jo hyvään mittaustarkkuuteen, ja lämpötilaeron voidaan lähes täysin olettaa olevan jäähdytyksessä tapahtuvia lämpöhäviöitä.

Mikäli jäähdytykseltä moottorille menevän öljyn lämpötila mittauksessa lämpenisi samalle tasolle kuin moottorilta saapuvan öljyn lämpötila, jäähdyttävää vaikutusta ei olisi, ja moottori lämpenisi hallitsemattomasti. Näin ei kuitenkaan ole.

#### 10.5 Esilämmityksen testaus ja kuormitustehon noston vaikutusten tarkastelu

Aiemmissa testeissä on tullut ilmeisen selväksi se tosiseikka, että mittauslaitteiston kapasiteetti ei riitä koneen täysmittaiseen lämpenemäkokeeseen halutuilla tehoilla. Tietyissä olosuhteissa moottorin lämpötila vakiintuu aina samalle tasolle (ks. luku 7.1, s. 21 - 23). On siis merkityksetöntä, millä tasolla moottoria on kuormitettu kuormituskokeen alkamispisteeseen asti, sillä sen loppulämpötilan suuruus ei silti muutu, jos ympäristötekijät pysyvät vakiona.

Testilaitteistolla saadaan aikaiseksi kaksi tapaa kuormittaa moottoria. Toinen on aiemmissa mittauksissa käytetty akusto, jolla kyetään 8 kW:n kuormituksiin. Toinen on tasavirtalähde, jolla moottorinohjainta kyetään kuormittamaan noin 3,2 kW:n teholla. On mahdollista, että moottoria esilämmitetään tasavirtalähteellä ennen kuormituskokeen aloittamista. Esilämmitys käytännössä tarkoittaa moottorin kuormittamista mahdollisimman heikolla jäähdytyksellä siten, etteivät moottorin osat lämpene yli sallittujen rajojen.

Moottorin lämmettyä halutulle tasolle, teholähteeksi vaihdetaan akusto ja aloitetaan varsinainen kuormituskoe halutulla teholla ja pumppausteholla. Koska nyt lähtölämpötila on ympäristön lämpötilaa huomattavasti korkeampi, on lämpenemiskokeen kestokin lyhentynyt. Tällä testillä ei saada selville aikavakiota, pelkkä maksimilämpenemä.

Tätä esilämmitystekniikkaa koestettiin 6.4.2011. Samalla mittausten päätökseen viemisen nopeuttamiseksi nostettiin kuormitustehoa 7 kW tasolle. Sen avulla tutkittiin, miten moottorin lämpenemäkäyrä käyttäytyy lähellä nimellistehoa.

Tähän asti on osoitettu, että pumpun tehokkaampi toiminta on välttämätöntä reilulla vajaakuormallakin. Pumpun jännite säädettiin 10,1 V:n tasoon, jotta se rajoittaisi lopulämpenemän tasoa mahdollisimman alas ja siten nopeuttaisi lämpenemäkäyrän taantumista.

Työn suoritusvaiheessa moottorin esilämmityksen aikana ulkoinen pumppu toimi tulpana jäähdytysjärjestelmässä, joten moottorin jäähdytysjärjestelmä oli pois käytöstä. Moottori saatiin lämmitettyä noin 85 °C:n lämpötilaan, minkä jälkeen laitteisto ajettiin alas ja teholähde vaihdettiin akustoon. Tämän aikana järjestelmä jäähdyi hieman. Kuormitustestin alkaessa ulkoinen pumppaus käynnistettiin, jolloin järjestelmässä ollut öljy lämpeni ympäristön lämpötilasta ja aiheutti hetkellisen jäähtymisen moottorin sisällä. (Ks. liite 30, Mittaustulokset 6.4.2011.)

Mittauksen alussa ongelmalliseksi osoittautui virtalähteen käyttö moottorin teholähteenä. Tämä johtui sen hitaasta reagoinnista kuormituksen muutoksiin. Kuormakoneen kytkeytyessä päälle, sen aikaansaama kuormituspiikki nosti tehontarvetta niin paljon, että virtalähteen vasteaika ei riittänyt ja jännite tippui moottorinohjaimen näkökulmasta alijännitteen puolelle. Näin ollen moottorinohjain teki aina hallitun alasajon ja testi keskeytyi.

Ongelma ratkesi kuormakoneen säätöjärjestelmän asetuksia muuttamalla. Kuorman säätö aiemmissa kokeissa oli 0–100 % kuormakoneen nimellisarvoista. Säätöä laajennettiin negatiiviselle alueelle -1–100 % välille. Tämän jälkeen haarukoitiin se piste, jossa kuormakone käynnistyessään ei kuormittanut liikaa testijärjestelmää tai avustanut sitä. Kuormakoneen säädön ollessa liian kaukana negatiivisella puolella, se avitti moottorin liikkumista ja käynnistyessään aiheutti testimoottorin ryntäämisen ja sitä kautta ylijännitepiikin moottorinohjaimelle, joka taas johti järjestelmän automaattiseen alasajoon. Haluttu piste löytyi -0,5 %:n kohdalta. Kun kuorma saatiin hallitusti mukaan koeajoon, sen säätöä voitiin muuttaa taas hallitusti ilman ongelmia.

Mittaustulosten perusteella laskettiin akselille tuotettu teho, kokonaistehonkulutus, hyötysuhde ja käämien lämpötila. (Ks. taulukko 9, tulokset.)

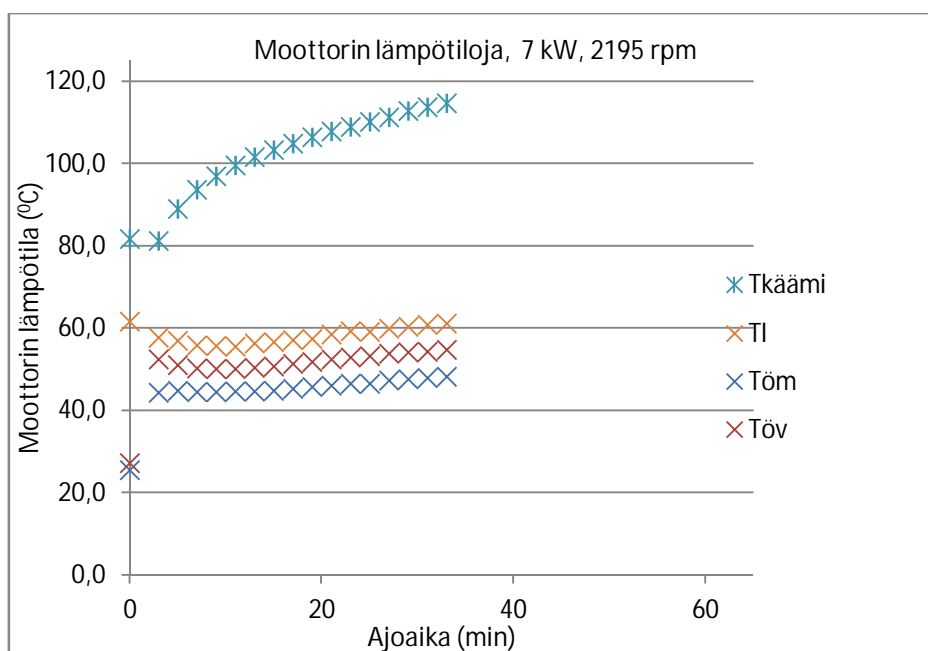
Taulukko 9. 6.4.2011 saatujen mittaustulosten perusteella lasketut arvot

t [min]	Ppotk [W]	Pin [W]	Tmoot [°C]	hyötysuhde
0	0	56	81,8	0,00
3	5482	6900	81,2	0,79
5	5482	6925	89,1	0,79
7	5482	6950	93,8	0,79
9	5482	7000	97,0	0,78
11	5482	7000	99,6	0,78
13	5482	7025	101,7	0,78
15	5482	7050	103,4	0,78
17	5482	7075	104,9	0,77
19	5482	7100	106,5	0,77
21	5482	7100	107,8	0,77
23	5482	7125	109,0	0,77
25	5482	6983	110,2	0,79
27	5482	7007	111,3	0,78
29	5482	7032	112,8	0,78
31	5482	7056	113,8	0,78
33	5482	7056	114,6	0,78

Testin aikana moottorin toteutunut kierrosnopeus ja akselille tuotettu momentti eivät olleet enää yhtä stabiileja, kuin aiemmissa, pienemmän teholuokan testeissä. Momentti vaihteli välillä 46,1–46,5 Nm ja moottorin kierrosnopeus välillä 2192–2197 rpm. Lisäksi öljyn viskositeetti muuttui silminnähävästi ja näytti virtaavan veden tavoin aiemman tahmean virtauksen sijaan. Pienemmän viskositeetin ansiosta virtausnopeus pumpaustehoa muuttamatta kasvoi.

Kuva 25 (ks. seur. s.) esittää 6.4.2011 suoritettussa kokeessa esiintyvien moottorin ja jäähdytysöljyn lämpötilojen kehitystä. Kuvaajasta nähdään, että käämin lämpötilan käyrä oli kokeen lopettamishetkellä yhä selvästi kasvava. Tästä voidaan päätellä, että esilämmityksestä huolimatta akuston kapasiteetti ei riittänyt 7 kW kuormituskokeen suorittamiseen.

Ensimmäisen ja toisen mittauspisteen välillä suoritettiin järjestelmän ylösajo, jolloin kuormitus ei ollut vielä haluttu, ja jonka aikana järjestelmä ehti jäähtyä hieman. Poikkeuksen muodosti öljy, joka heti testin alussa alkoi kiertyä esilämmitetyn moottorin läpi ja näin ollen alkoi lämmitä ympäristön lämpötilasta kohti käyttölämpötilaansa.



Kuva 25. Käämilämpötila  $T_{käämi}$ , laipanlämpötila  $T_l$  sekä öljyn lämpötila moottorille mennessä  $T_{öm}$  ja jäähdytysveteen mennessä  $T_{öv}$

Ylälaipan lämpenemistä tarkastellessa nähdään, että ympäristön lämpötilasta lämmennyt öljy on viilentänyt laippaa mittauksen alkuvaiheessa, mutta lämmentyään on laipan lämpeneminen lähtenyt nousuun muiden muuttujien mukana.

Esilämmitys huoneenlämmöstä noin 80 asteeseen kuitenkin vaikuttaa tuottaneen tuloksia, sillä moottorin lämpötila saatiin 33 minuutin kuormituskokeessa noin 115 °C:een. Esilämmitystä on jatkossa syytä tehostaa, jotta lähtölämpötila saataisiin ylemmäs, mikäli teholahteiden käytettävyyttä ei saada paranemaan.

#### 10.6 Kahden rinnakkaisen teholahteen mahdollistama pitkäkestoinen testaus

Tähänastiset kuormitustestit olivat jääneet varsin lyhyiksi akuston kapasiteetin ja DC-lähteen koon vuoksi. Oceanvolt sai 8.4.2011 laitetoimittajalta toisen DC-lähteen, identtisen aiemmin käytetyn kanssa. Nämä lähteet oli mahdollista kytkeä rinnan, ja näin ollen niistä saatu teho yhteensä on kaksinkertainen aiempaan, eli lähteistä saatu nimellisteho kasvoi 3,24 kW:sta 6,48:aan. Näin ollen oli mahdollista toteuttaa aiemmin kesken jäänyt 4,6 kW:n teholla ajettu lämpenemäkoje ja todentaa aiemmin esitetyt oletukset. (Mittaustulokset 8.4.2011 ja Lopulliset testijärjestelyt, ks. liitteet 31 - 32.)

Testin aikana moottorissa havaittiin tärinää ja ylimääräistä melua vetolaitteen suunnalta 55 minuutin kohdalla. Koneen kiinnitykset näyttivät löystyvän ja 92 minuutin ajon jälkeen koe jouduttiin keskeyttämään. Keskeytyksen jälkeen havaittiin, että kiinnitykset todella olivat ajan mittaan löystyneet, ja kone oli kääntynyt vinoon. Näin ollen vetolaitteen ja kuormakoneen akselit eivät olleet kohdakkain.

Mittaustulosten perusteella laskettiin akselille tuotettu teho, kokonaistehonkulutus, hyötysuhde ja käämien lämpötila. Tulokset ovat nähtävissä taulukossa 10.

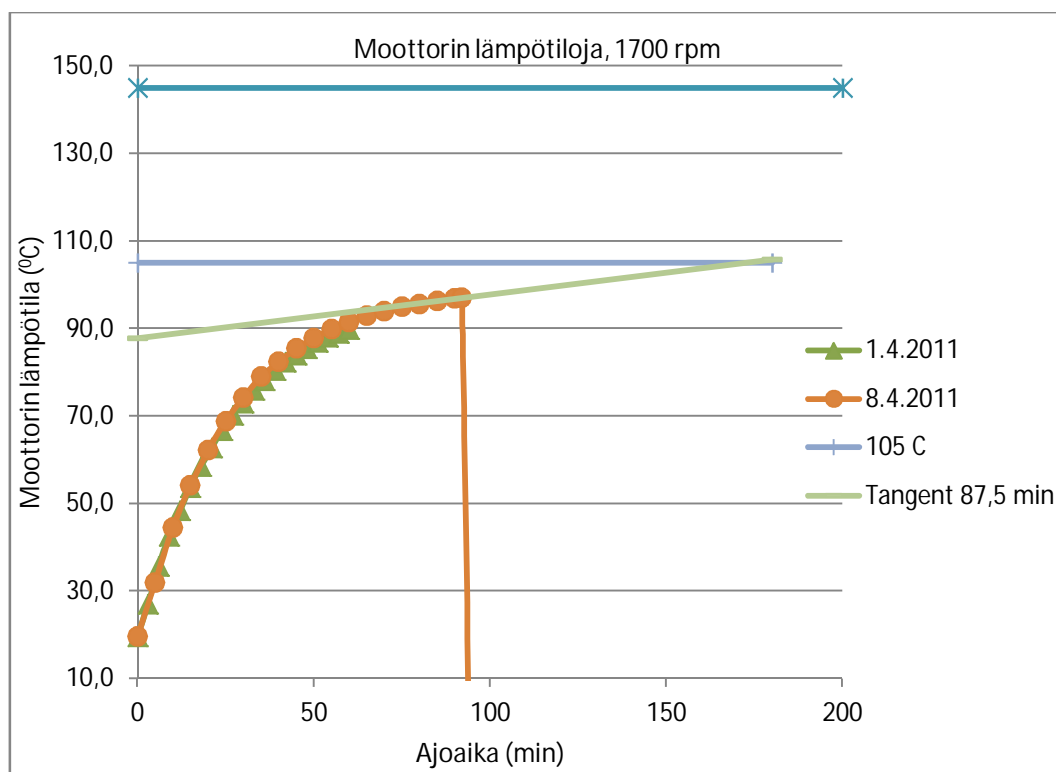
Laskennallisten arvojen perusteella piirretään kuvaaja, jossa vertaillaan toteutunutta lämpenemäkäyrää aiempaan vastaavilla testiarvoilla saatuun lämpenemäkäyrään. Havainnollisuuden vuoksi käyrästään lisätään maksimilämpenemän käyrä sekä oletettu 4,6 kW:n teholla aikaansaatu lämpenemä 105 °C ja viimeisten käypien mittaustulosten tangentti *Tangent 87,5 min*. Käyrät ovat kuvassa 26 (ks. s. 59).

Koska lämpeneminen hidastuu jatkuvasti, on *Tangent 87,5 min* arvio yläkanttiin. Aliarvioitujen tulokset voivat olla vaarallisia, koska silloin todellinen lämpenemä voi ylittää kriittisen rajan. Siksi arvioissa käytetään varmuuden vuoksi hieman yliarvioitua tulosta.

Taulukko 10. 8.4 mittaustulosten perusteella lasketut arvot

t [min]	P <sub>potk</sub> [W]	P <sub>in</sub> [W]	T <sub>moot</sub> [°C]	hyötysuhde
0	0	0	19,6	0
5	3773	4766	31,9	0,79
10	3773	4789	44,4	0,79
15	3773	4728	54,1	0,80
20	3773	4807	62,1	0,78
25	3773	4807	68,8	0,78
30	3773	4807	74,2	0,78
35	3773	4766	78,9	0,79
40	3773	4829	82,3	0,78
45	3773	4742	85,5	0,80
50	3773	4835	87,8	0,78
55	3773	4762	89,8	0,79
60	3773	4754	91,5	0,79
65	3773	4786	92,9	0,79
70	3773	4760	94,0	0,79
75	3773	4855	95,0	0,78
80	3773	4814	95,6	0,78
85	3786	4855	96,3	0,78
90	3786	4774	96,8	0,79
92			97,0	

Kuvasta 26 nähdään, että mittaustulokset ovat varsin lähellä toisiaan. Jälkimmäisessä mittauksessa ei silti vielä päädytä riittävään lopputulokseen, sillä selkeää lämpenemistä on käyrästä 8.4.2011 yhä havaittavissa. Koneen oletetaan kuvaajaa tarkastelemalla lämpenevän 4,6 kW:n teholla vielä noin 105 °C:n tasolle. Selkeän tuloksen saaminen vaatisi kuitenkin noin 200 - 300 minuutin mittaista lämpenemäkoetta, jotta lämpötilan muutokset käämeissä ja laipassa saataisiin tasoittumaan.



Kuva 26. Käämilämpötila 4,6 kW kokeissa ulkoisen pumpun toimiessa 6,5 V:n jännitteellä

Koska tietyllä jäähdytysteholla ja tietyllä moottorilla on samoissa ympäristöolosuhteissa aina sama aikavakio, on käytettävä arvioitua 105 °C:n loppulämpenemää aikavakion arvioimiseksi. Kuvaan 26 piirretty tangentti saavuttaa arvioidun loppulämpenemän pisteen 182 minuutin kohdalla. Tässä kohtaa koneen voidaan olettaa saavuttaneen lopullisen lämpötilansa.

Näin ollen aikavakion  $\tau$  arvioidaan olevan neljännes siitä eli 45,5 minuutin kohdalla. Testeissä tätä voidaan käyttää maksimilämpenemän selvittämiseen muilla teholuokilla, mikäli täyspitkää mittausta ei kyetä mahdollistamaan. Maksimilämpenemä saadaan piirtämällä lämpenemän tangentti kuormituskokeen aloitushetkellä sekä suora 45,5 minuutin kohdalle. Näiden suorien leikkauspiste on oletetun maksimilämpenemän tasolla.



Tässä käytetyn silmämääräisen arvion sijasta aikavakio  $\tau$  voidaan arvioida myös sovitamalla mittaustuloksista piirretty käyrä tunnetun lämpenemäkäyrän päälle ja katsoamalla siitä, missä kohtaa todella 63 % lämpenemästä on saavutettu. Tämä on yhtä lailla epätarkka arvio, sillä siinä tulevat vastaan piirustustekniset virhetekijät.

## 11 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä perehdyttiin propulsiokäyttöön tulevaan kestopagneettimoottoriin, sen oheislaitteisiin ja aiheeseen liittyvään teoriaan. Lisäksi suoritettiin yhdelle kestopagneettimoottorille useita lämpenemäkokeita, joissa pyrittiin selvittämään moottorin toimintakyky erilaisissa käyttötilanteissa.

Lämpenemän osalta loppuun vietyä mittausta ei testilaitteistolla saatu suoritettua. Aikataulullisista syistä mittauksien jatkaminen ei onnistunut 8.4.2011 jälkeen. Suoritetuista mittauksista saatiin kuitenkin selville moottorissa esiintyviä puutteita sekä mittauksiin liittyviä ongelmia. Lisäksi testijärjestelyjen kehittämiseen syntyi ideoita.

Mittauksissa esiintyneiden tehonsyöttöön liittyvien ongelmien johdosta alkuperäistä suunnitelmaa ei kyetty suorittamaan, vaan mittauksissa keskityttiin puolella teholla syntyneen lämpenemän tutkimiseen eri tavoin ja mittausmenetelmien luotettavuuden todentamiseen. Vaikka testejä nimellisteholla ei päästy suorittamaan, saaduista mittaustuloksista on kuitenkin pääteltävissä, ettei jatkuvaa käyttöä nimellisteholla voida järjestää nykyisellä pumpulla. Noin puolella teholla järjestelmä lämpeni 109 °C:n tasolle, eikä selvää tasaantumista lämpenemisessä ollut havaittavissa.

Mittaus suoritettiin avoimessa tilassa. Veneolosuhteissa moottori ja sen ohjain tulevat olemaan pienehkössä suljetussa tilassa, mahdollisesti jopa lähellä toisiaan. Molemmat tuottavat lämpöhäviöitä, jolloin tehokkaan jäähdytyksen merkitys korostuu entisestään.

Jäähdytysjärjestelmän pumppua on siis kehiteltävä esimerkiksi sen lapoja muotoilemalla. Mikäli akselille kiinnitettyä pumppua ei saada riittävän tehokkaaksi, on ulkoisen pumpun käyttöönottoa harkittava. Tämä heikentää hyötysuhdetta, mutta takaa luotettavamman toiminnan. Pumppausjärjestelmän kehittymisen myötä lämpenemisen jatko-tutkimukset ovat paikallaan.

Pumpun kehittämissä ja moottorin lämpenemisen jatkotutkimuksissa on käytettävä öljyn kanssa luotettavasti toimivaa virtausmittaria. Sen avulla on mahdollista selvittää, mihin pumppaustehoihin on välttämätöntä päästä, jotta moottori ei lämpene liikaa halutuissa ajoissa.

Lämpötilamittausten onnistumista ajatellen on ensiarvoisen tärkeää, että ympäristötekijät eivät pääse vaikuttamaan mittauksiin. Tästä syystä lämpöanturien sijoitteluun on kiinnitettävä huomiota. Luotettavimmat tulokset nesteitä mitatessa saadaan siten, että anturin pää on kokonaan kyseisessä nesteessä.

Moottorin värinöiden vuoksi on mahdollista, että anturit eivät jatkuvasti ole kosketuksessa pintaan, jonka lämpötilaa ne mittaavat. Siksi anturin kiinnitys on tehtävä huolella, ja lämmönjohtavuutta on parannettava lämpöä hyvin johtavilla elastisilla materiaaleilla. Näistä materiaaleista on hyötyä erityisesti siinä tilanteessa, kun anturi irtaantuu mittauspinnastaan hieman.

Mittaamisen epätarkkuutta lisää se, että mittaa useita arvoja samanaikaisesti. Mitattaessa esim. viittä eri lämpötilaa jatkuvasti ja pitkäkestoisesti, on syytä rakentaa järjestelmä, jossa lämpötilan arvot saadaan automaattisesti esim. sähköiseen muotoon. Tämä jättää mittausten suorittajalle aikaa seurata järjestelmässä esiintyviä ilmiöitä, sekä vähentää mittausepätarkkuuksia, vähentää inhimillisten merkintävirheiden riskiä ja helpottaa mittausten tarkastelemista.

Mittausjärjestelmän kehittymisen myötä mittajalle jää enemmän aikaa tarkastella järjestelmää esimerkiksi lämpökameran avulla, jolla näkee moottorin kuumimmat pisteet. Sen avulla voidaan tutkia, mitkä kohdat moottorissa lämpenee liikaa ja missä kohtaa jäähtytystä mahdollisesti tarvitsee kehittää.

Öljynkiertojärjestelmän ollessa keskeisenä osana mittauksia, on sen rakenne suunniteltava monikäyttöiseksi. Mittaussarjan alussa ei ole välttämättä tiedossa, minkälaisia pulmia joudutaan ratkomaan. Siksi on tärkeää, että öljykanavistossa on runsaasti sulkuventtiileitä, jotta järjestelmän täydentäminen ei vaadi koko järjestelmän purkamista osiin. Tämä säästää sekä purkuun, kasaukseen että kanaviston ilmaamiseen kuluva aikaa.

Lisäksi öljynkiertojärjestelmässä olevien yksittäisten komponenttien, kuten pumppujen ja mittareiden rinnalla tulisi olla sivuhaara, jotta ne voidaan tarvittaessa ohittaa helposti venttiilien avulla. Helposti hallittavissa olevan pumpun sisällyttäminen järjestelmään on myös erittäin tärkeää, sillä se takaa järjestelmän luotettavan ja nopean ilmaamisen.

Hyötysuhteiden ja vetolaitteen lämmönluovutuksen tarkastelussa on lämpenemäkokeissa suositeltavaa mitata moottorinohjaimelta moottorille syötetyn virran ja jännitteen suuruus. Niiden avulla voidaan laskea pelkän moottorin hyötysuhde. Kun tunnetaan myös moottorin tuottama hyötyteho, voidaan laskea moottorin aiheuttamat lämpöpohäviöt ja siten moottorin tarvitsema jäähdytysteho.

Mikäli moottorinohjain sijoitetaan samaan tilaan veneessä kuin moottori, on konehuoneen jäähdytystä tutkittava erikseen, sillä moottorinohjain puhaltaa ympäristöönsä lämmintä ilmaa. Siten se lämmittää moottoria entisestään ja lisää moottorin jäähdytyksen tarvetta. Siksi onkin suositeltavaa sijoittaa nämä laitteet eri tilaan, jolloin moottori voi olla suljetussa tilassa, koska sen tarvitsema jäähdytys tapahtuu vetolaitteen kautta. Tällöin riittää, että pelkälle moottorinohjaimelle varmistetaan riittävä jäähdytysilman saanti.

Lämpenemisen jatkotutkimuksissa on neljä vaihtoehtoa. Joko on kasvatettava DC -teholähteiden maksimitehoa, akuston kapasiteettia, jatkettava mittauksia jakamalla se pienempiin osiin tai selvitettävä aikavakio niin pienessä teholuokassa, että nykyinen kalusto siihen riittää. Teholähteiden tehonsyöttökykyä kasvattamalla päästään käytännössä äärettömän pitkiin lämpenemiskokeisiin ja siten parhaimpaan mittaustarkkuuteen. Tämä ratkaisu vaatii käytännössä lisää rinnan kytkettäviä teholähteitä. Menetelmä on kuitenkin erittäin kallis toteuttaa.

Akuston tehonsyöttökyky riittää tarvittaviin mittauksiin alle nimellisteholla, mutta sen kapasiteetti ei riitä mittausten riittävän pitkäaikaiseen jatkamiseen. Akuston kasvattamisen ongelmana on se, että myös latausajat kasvavat. Akusto on myös erittäin kallis ratkaisu, eikä sillä kyetä toteuttamaan ylikuormitustestejä.

Kolmas ratkaisu on käyttää niin sanottua moottorin esilämmitystä, jossa järjestelmän lämpeneminen mitataan ensin huoneenlämmöstä siihen asti, kun akuston kapasiteetilla päästään. Sen jälkeen ladataan akusto, esilämmitetään moottoria lähelle ensimmäisen

mittauksen tasoa DC -teholähteillä ja vaihdetaan akustokäyttöön moottorin lämmentyä. Akkuihin vaihdon jälkeen jatketaan lämpenemäkoetta ja piirretään uusi kuvaaja, joka alkaa läheltä sitä pistettä, johon ensimmäisessä mittauksessa päästiin. Esilämmitystä voidaan tehostaa jäähdytysjärjestelmän toimintaa rajoittamalla.

Tämän jälkeen ladataan akusto, esilämmitetään moottori toisen mittauksen loppuvaiheen tasolle DC-lähteellä, vaihdetaan taas akustokäyttöön ja jatketaan lämpenemäkoetta toisen mittauksen loppuvaiheen tasolta. Tätä jatketaan niin kauan, kunnes on saatu piirrettyä täydellinen moottorin lämpenemäkäyrä. Tämän mittaustavan ongelmana on mittaustulosten vertailukelpoisuuden vaikea todentaminen ja hidas toteuttaminen. Lisäksi tällä menetelmällä ei voida selvittää ylikuormituksessa mahdollisesti esiintyviä ongelmia.

Neljäs vaihtoehto täysmittaisen lämpenemäkokeen suorittamiseen on tehdä mittaukset niin pienellä teholla, että se voidaan suorittaa käytössä jo olevilla teholähteillä. Tässä mittauksessa saatujen tulosten perusteella lasketaan aikavakio. Sen jälkeen tehdään suuremman teholuokan testit akustoa käyttäen. Kun tiedetään aikavakio ja suurempien teholuokkien lämpenemisen alkutangentti, voidaan arvioida varsin tarkasti loppulämpenemän suuruus. Tämä on vaihtoehtoista halvin ja silti suhteellisen luotettava tapa. Sen käytettävyyttä rajoittaa ainoastaan akuston teho.

## Lähteet

1. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Verkkodokumentti.  
<<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/30272/tmp.objres.353.pdf?sequence=1>>. Luettu 16.2.2011.
2. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Verkkodokumentti.  
<<https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/2413/Taajuusmuuttajan%20kayttokohteet.pdf?sequence=1>>. Luettu 15.2.2011.
3. Aalto-yliopisto. Verkkodokumentti.  
<[http://www.tkk.fi/Yksikot/Laiva/Opinnot/Kurssit/Kul-24.3400/poj/POJ\\_luku\\_1.pdf](http://www.tkk.fi/Yksikot/Laiva/Opinnot/Kurssit/Kul-24.3400/poj/POJ_luku_1.pdf)>. Luettu 16.2.2011.
4. Oceanvolt Ltd. Verkkodokumentti.  
<[http://www.oceanvolt.com/pdf/en/Oceanvolt\\_brochure2010\\_web.pdf](http://www.oceanvolt.com/pdf/en/Oceanvolt_brochure2010_web.pdf)>. Luettu 15.2.2011.
5. Ijäs, Jari. 2011. Sähkövoimatekniikan koulutusvastaava, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Helsinki. Sähköpostikeskustelu 27.4.2011.
6. Lax, Richard. 2011. Oceanvolt Ltd, Helsinki. Sähköpostikeskustelu 27.4.2011.
7. Heino, Toni. 2001. Laivan sähköisen potkurijärjestelmän mitoituksen tuotteistaminen. Diplomityö. Aalto-yliopisto.
8. Nummelin, Ville. 2006. Kestomagneettimoottorit. Insinöörityö. Helsingin ammattikorkeakoulu.
9. Hook, J.R. & Hall, H.E. 1991. *Solid State Physics*. Wiley. 2nd ed. Chichester.
10. Aitamurto, Juha-Matti. 2005. Kestomagneettitahtikonetesterin modernisointi. Insinöörityö. Helsingin ammattikorkeakoulu.
11. Nipp, Eckart. 1999. Verkkodokumentti. <<http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:8554/FULLTEXT01>>. Luettu 11.2.2011.
12. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Verkkodokumentti.  
<<https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bk60a0001/lisatty/sahkokaytot.pdf>>. Luettu 11.2.2011.
13. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Verkkodokumentti.  
<[http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical\\_engineering/articles/electrical\\_motor/sivut/default.aspx](http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/articles/electrical_motor/sivut/default.aspx)>. Luettu 11.2.2011.
14. Wikipedia. Verkkodokumentti.  
<[http://fi.wikipedia.org/wiki/vieras\\_magneetoitu\\_tahtimoottori](http://fi.wikipedia.org/wiki/vieras_magneetoitu_tahtimoottori)>. Luettu 11.2.2011.

15. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Verkkodokumentti.  
<[http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical\\_engineering/research/electricaldrives/publications/Documents/Diplomity%C3%B6t/Jesse\\_Kokkonen.pdf](http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/research/electricaldrives/publications/Documents/Diplomity%C3%B6t/Jesse_Kokkonen.pdf)>.  
Luettu 11.2.2011.
16. Wikipedia. Verkkodokumentti. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/askelmoottori>>. Luettu 11.2.2011.
17. Sainio, Veli-Matti. 2010. Hybridiaskelmoottorin mallinnus ja ohjaus nosturisoveluksessa. Diplomityö. Aaltoyliopisto.
18. Wikipedia. Verkkodokumentti.  
<<http://fi.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4hk%C3%B6moottori>>. Luettu 11.2.2011.
19. Väisänen, Tero. 2002. Vääntömomenttisäädetyin kesomagneettimoottorin propulsiomoottorin koestusjärjestely. Insinööritoimisto. Helsingin ammattikorkeakoulu.
20. Aalto-yliopisto. Verkkodokumentti.  
<[http://www.tkk.fi/Yksikot/Laiva/Opinnot/Kurssit/Kul-24.4410/pdf/luku\\_5.2.pdf](http://www.tkk.fi/Yksikot/Laiva/Opinnot/Kurssit/Kul-24.4410/pdf/luku_5.2.pdf)>. Luettu 11.2.2011.
21. Tekniikka & Talous. Verkkodokumentti.  
<<http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article25452.ece>>. Päivitetty 27.1.2005.  
Luettu 11.2.2011.
22. Motorbikes.com. Verkkodokumentti.  
<<http://www.motoredbikes.com/showthread.php?t=22643&page=7>>. Päivitetty 15.9.2009. Luettu 11.2.2011.
23. Dexter Magnetics. Verkkodokumentti. <<http://www.dextermag.com/Samarium-Cobalt-Magnets>>. Luettu 18.2.2011.
24. Verkkodokumentti. <<http://www.coolmagnetman.com/magcare.htm>>. Luettu 18.2.2011.
25. AXCO-Motors Oy. Verkkodokumentti.  
<<http://www.axcomotors.com/aksiaalivuomoottori/aksiaalivuotekniikka.html>>. Luettu 3.3.2011.
26. VEM motors Finland Oy. Verkkodokumentti.  
<<http://www.vem.fi/uutiset/2010/Kestomagneettikoneet-lisaaavaet-prosessin-tehoa-ja-vaehentaevaet-energiakuluja>>. Luettu 11.2.2011.
27. Gieras, Jacek. 2010. Permanent magnet motor technology, 3rd ed. USA: CRC Press, Taylor & Francis Group.
28. Aalto-yliopisto. Verkkodokumentti. <[https://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/kul-24.4110/luennot/Kul-24\\_4110\\_lecture\\_2.pdf](https://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/kul-24.4110/luennot/Kul-24_4110_lecture_2.pdf)>. Viitattu 30.3.2011.
29. Ijäs, Jari. Moottorit. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

30. ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. Vaasa Oy.
31. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Verkkodokumentti.  
<<https://wiki.metropolia.fi/display/iboat/iBoats%2C+Intelligent+Boats>>. Viitattu 30.3.2011.
32. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Verkkodokumentti.  
<<http://www.metropolia.fi/tutkimus-ja-kehitys/hankkeet/teollinen-tuotanto/iboats/>>. Viitattu 30.3.2011.
33. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Verkkodokumentti.  
<<https://wiki.metropolia.fi/display/epropulsion/ePropulsion>>. Viitattu 30.3.2011.
34. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Verkkodokumentti.  
<[www.oamk.fi/~vejok/TL9101/Seminaarit/CAN.doc](http://www.oamk.fi/~vejok/TL9101/Seminaarit/CAN.doc)>. Luettu 25.2.2011.
35. Cadex Electronics Inc. Verkkodokumentti.  
<[http://batteryuniversity.com/learn/article/whats\\_the\\_best\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_battery)>. Luettu 2.3.2011.
36. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Verkkodokumentti.  
<<https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/43937/nbnfi-fe200902241199.pdf?sequence=3>>. Luettu 2.3.2011.
37. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Verkkodokumentti.  
<<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/66236/nbnfi-fe201011253031.pdf?sequence=3>>. Luettu 2.3.2011.
38. ThermoAnalytics Inc. Verkkodokumentti.  
<<http://www.thermoanalytics.com/support/publications/batterytypesdoc.html>>. Luettu 2.3.2011.
39. Kjellman, Janne. 2011. Oceanvolt Ltd, Helsinki. Sähköpostikeskustelu 28.1.2011.
40. Janz, Thomas. 2011. Perm Motor GmbH, Schönau. Sähköpostikeskustelu 3.3.2011.
41. Lax, Richard. 2011. Oceanvolt Ltd, Helsinki. Sähköpostikeskustelu 28.1.2011.
42. Paavilainen, Heikki. 2011. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusvastaava, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Helsinki. Sähköpostikeskustelu 24.3.2011.

## CAN -väylärasia



*Kuva 1. CAN -väylärasia ja siitä lähtevä datakaapelointi*

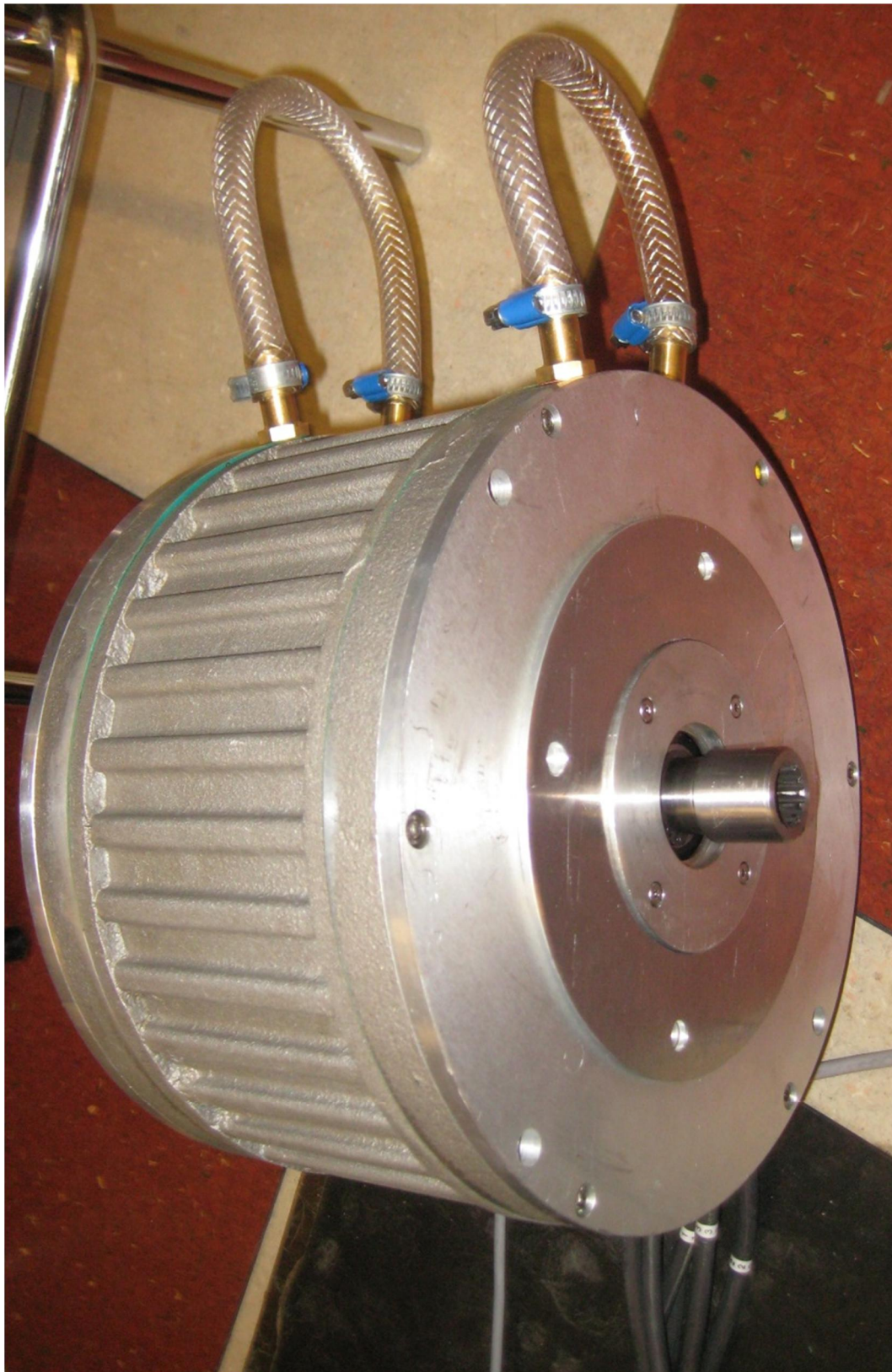


## DC -teholähde



Kuva 2. DC-teholähde

PM -moottorin runko



*Kuva 3. Kestomagneettimoottori poikittain lattialla; öljykanavat oikosuljettu (ylhäällä) ja akselinpää avoin (oikealla)*

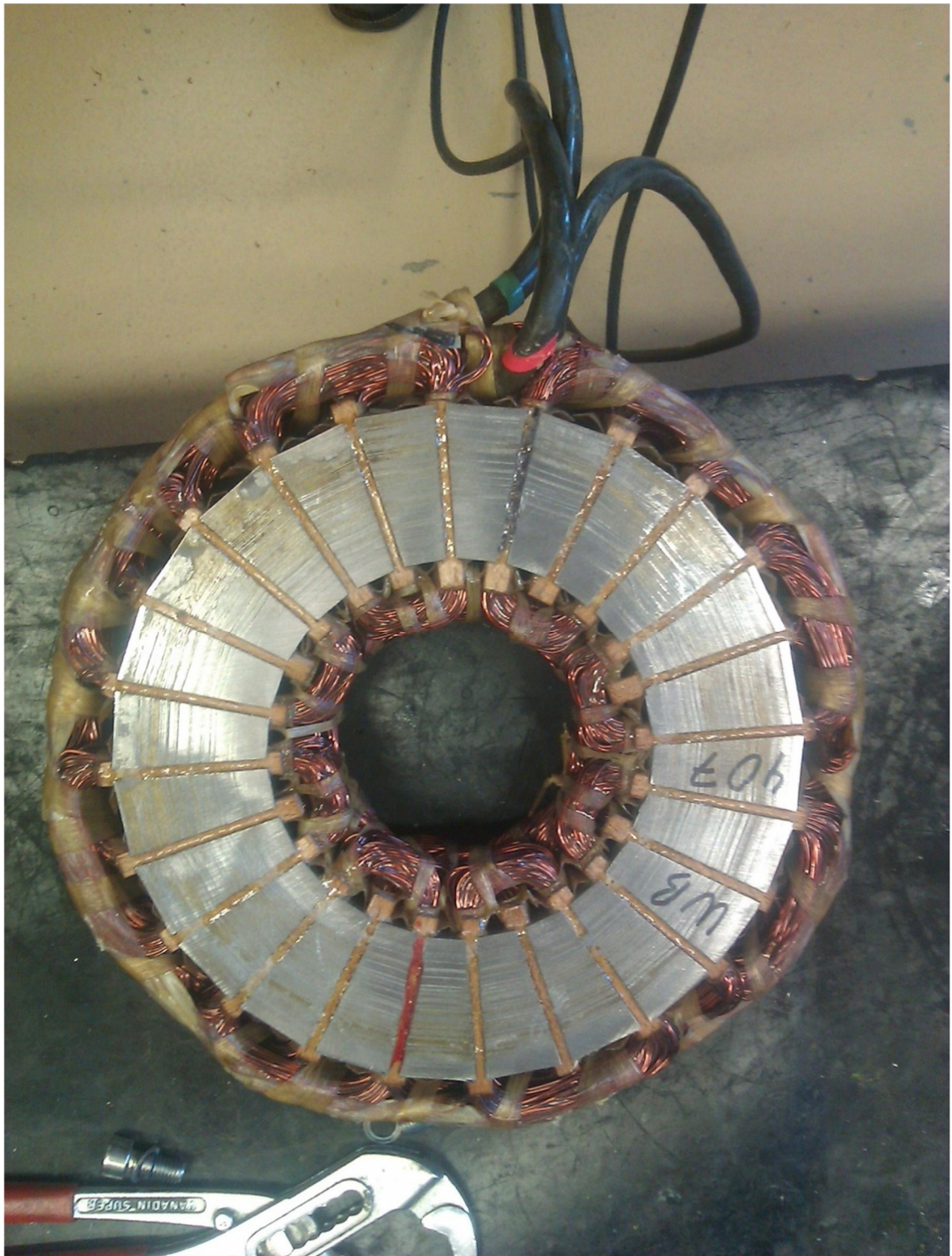


# PM -moottorin roottori



*Kuva 4. Roottori ja sen rakenteeseen viistosti upotetut kestomagneetit*

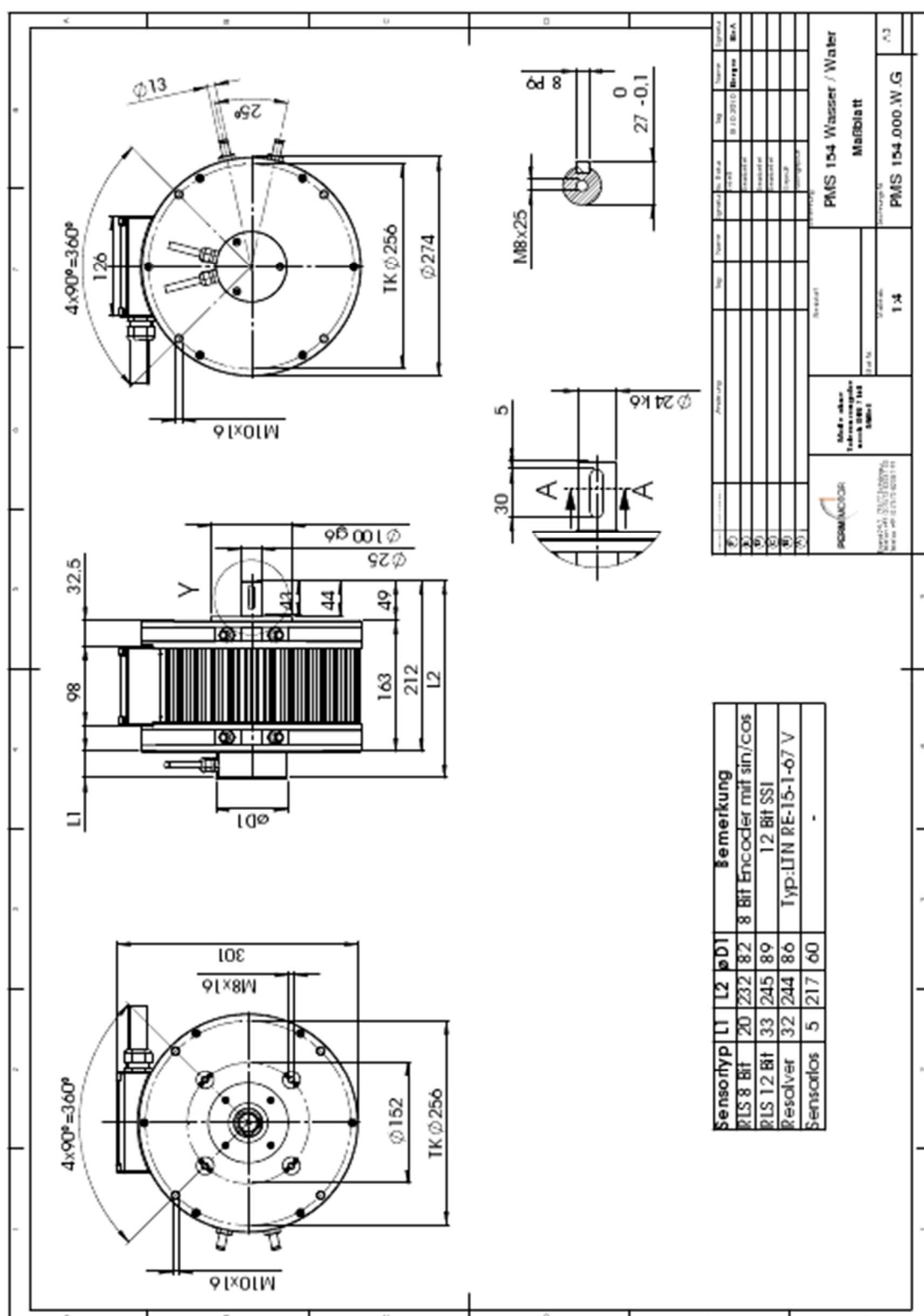
## PM -moottorin staattorikäämitys



Kuva 5. Staattori; sähkönsyöttökaapelit (ylhällä) tulevat kolmivaihekäämitykseen joka kiertää staattoria ja sen levypakkaa (harmaa)

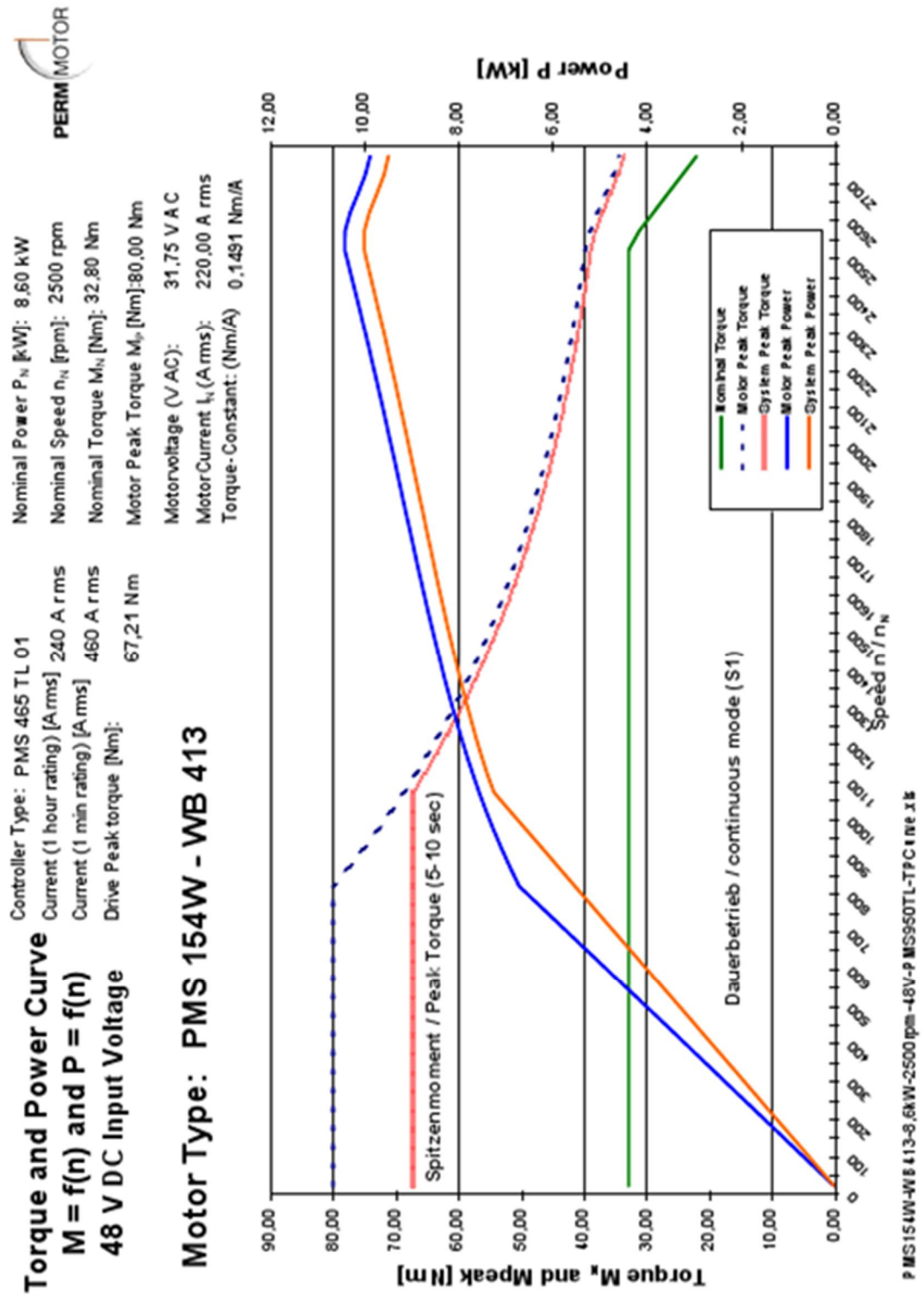


## PM -moottorin mekaaniset mitat



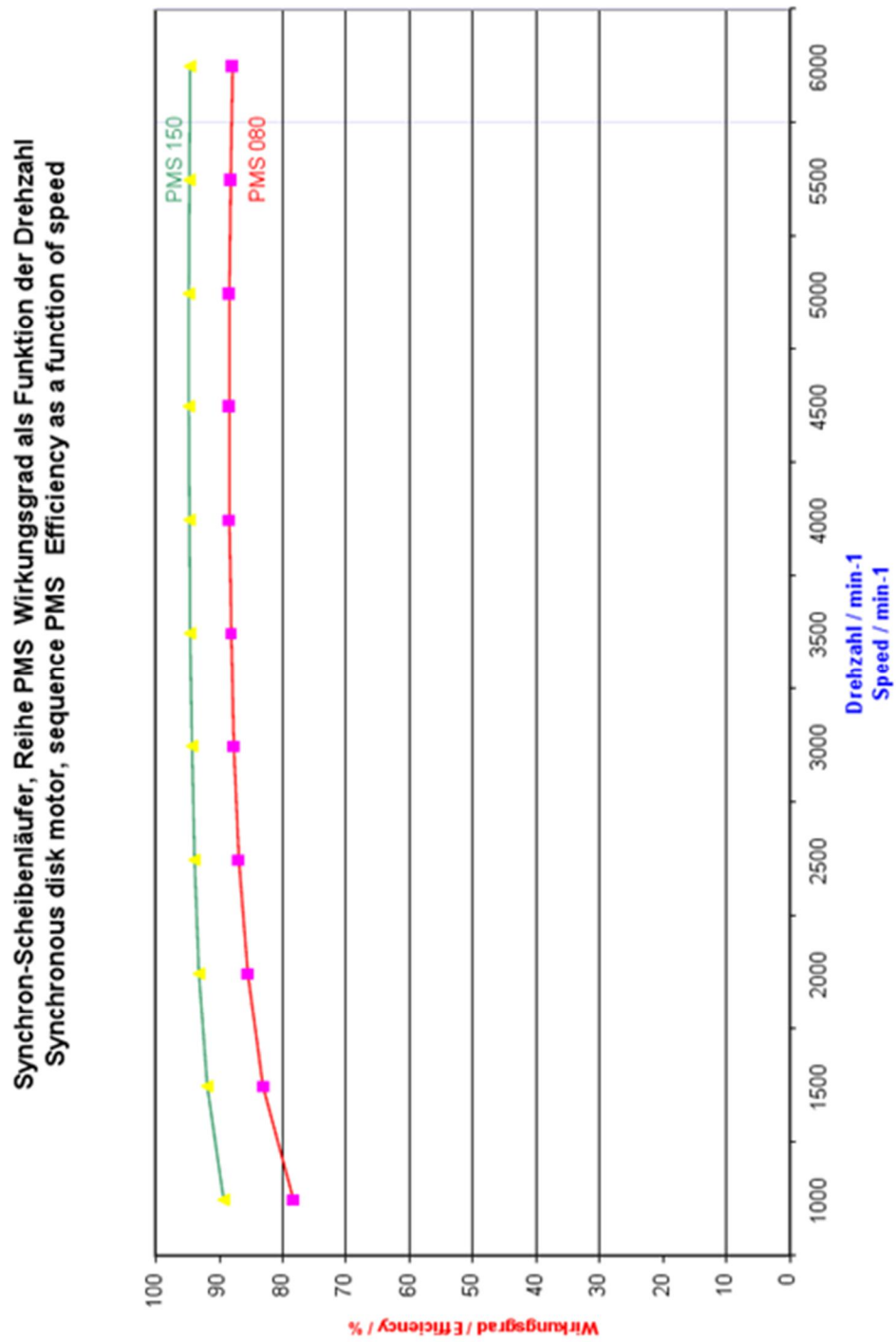
*Kuva 6. Moottorirakenteen mekaanisia mittoja*

PM -moottorin teho- ja momenttikäyrät



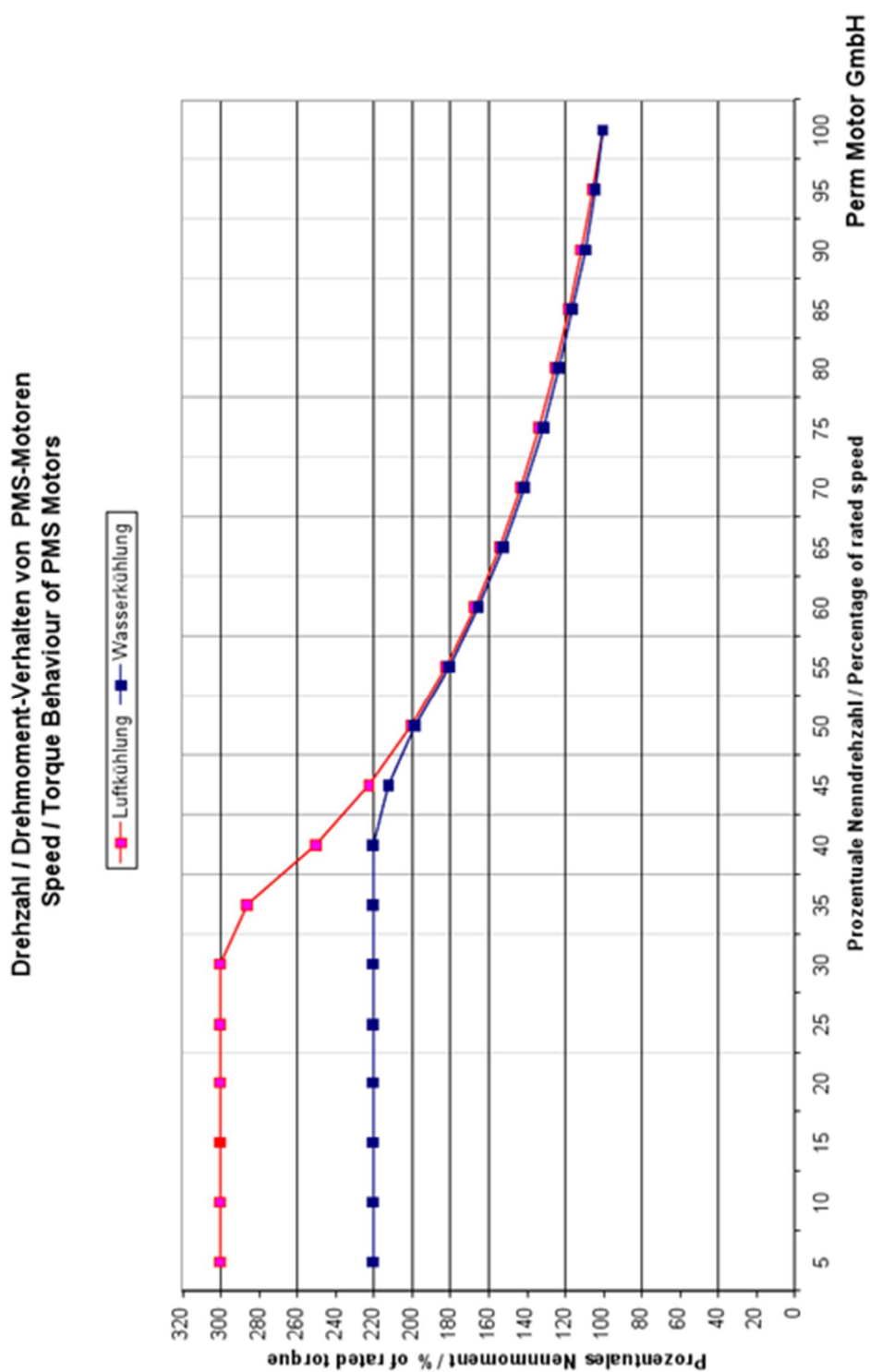
Kuva 7. PMS 154W -moottorityypin teho- ja momenttikäyrät kierrosnopeuden funktiona

## PM -moottorin hyötysuhdekaavio



Kuva 8. PMS 154W –moottorin hyötysuhdekäyrä kierrosnopeuden funktiona

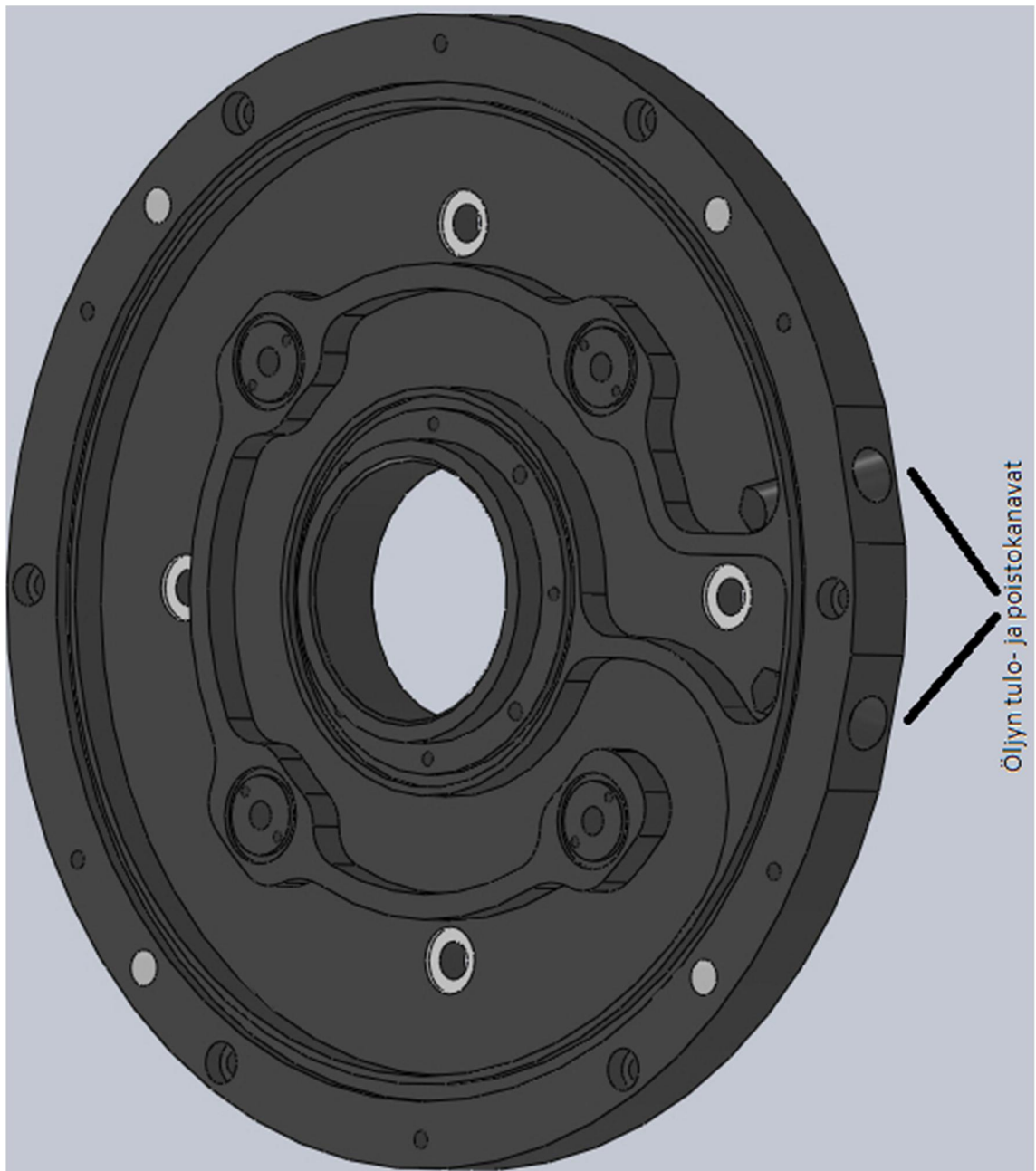
## PM -moottorin momenttikaavio



Kuva 9. PMS 154W –moottorin kyky tuottaa momenttia nimellismomenttiin nähden eri kierros-alueilla; alle nimelliskierroksilla moottori kykenee jäähdytyksestä riippuen jopa kolminkertaiseen nimellismomenttiin



PM -moottorin laipan öljykanava



Kuva 10. Ylälaipan öljykanava; öljy kiertää laipan sisällä akselinsa ympäri kahdesti jäähdyttääksään rakennetta

## IEC -standardit 60034-6 ja 60034-1

## Luku 17: Moottorit ja generaattorit

Taulukko 17.5a. Sähkökoneiden tavallisimmat IC-luokat, IEC 60034-6 (1991).

Merkintä	Määritelmän epävirallinen suomennos
IC 00	Konetta ympäröivä ilma jäähdyttää koneen sisäosat. Roottorin tuuletusvaikutus on merkityksetön. Jäähdytysaineen liike johtuu lämpötilaeroista.
IC 01	Kuten IC 00, paitsi että akselille tai roottoriin asennettu tuuletin saa aikaan ilman virtauksen.
IC 06	Jäähdytysmenetelmä on sama kuin kohdassa IC 01, mutta jäähdytysaineen virtaus saadaan aikaan koneeseen asennetulla tuulettimella, jonka toiminta on riippumaton pääkoneen pyörimisnopeudesta.
IC 11	Koneeseen kanavan kautta tuleva ilma poistuu vapaasti koneen ympäristöön. Ilmanvirtaus saadaan aikaan tuulettimella, joka on asennettu akselille tai roottoriin.
IC 31	Tuleva ja lähtevä ilma virtaa kanavien kautta. Virtauksen aiheuttava tuuletin on kiinnitetty akselille tai roottoriin.
IC 411	Suljettu, sisäinen ilman virtaus ja vaippajäähdytys koneen akselille asennettujen tuulettimien avulla
IC 511	Suljettu, sisäinen ilman virtaus. Lämpö johdetaan koneen sisään rakennetun ilma-ilma-lämmönvaihtimen kautta (tavallisesti ns. putkijäähdytin) ulkopuoliseen ilmaan, jonka virtaus saadaan aikaan akselille asennetulla tuulettimella
IC 611	Kuten IC 511, mutta lämmönvaihdin on kiinnitetty koneeseen sen ulkopuolelle
IC 7A1 W7	Suljettu, sisäinen jäähdytysaineen virtaus. Sisäisen ilmankierron saa aikaan pääkoneen pyörimisnopeudesta riippuva tuuletin. Lämpö johdetaan koneen sisään rakennetun vesi-ilma-lämmönvaihtimen kautta jäähdytysveteen, jonka virtaus saadaan aikaan joko verkkopaineen tai apupumpun avulla
IC 8A1 W7	Kuten IC 7A1 W7, mutta lämmönvaihdin on kiinnitetty koneeseen sen ulkopuolelle.

Taulukko 17.5b. Sähkökoneiden eristysluokat IEC 60034-1 mukaan, tavallisin tapaus.

Määritelmät		Eristysluokka		
		B	F	H
Sallittu "kuumimman pisteen" lämpötila	°C	130	155	180
Sallittu vastusmittauksen avulla määritetty käämityksen lämpötila	°C	120	145	165
Sallittu käämityksen lämpenemä, kun ympäristön korkein lyhytaikainen lämpötila on + 40 °C	°C	80	105	125

Kuva 11. IEC-standardit 60034-6 ja 60034-1; PMS 154W ei asetu minkään standardin alle jäähdytyksen osalta

## KTY84 -anturien vastusarvotaulukko

Philips Semiconductors

Product specification

## Silicon temperature sensors

## KTY84 series

**Table 1** Ambient temperature, corresponding resistance, temperature coefficient and maximum expected temperature error for KTY84/130 and KTY84/150 $I_{cont} = 2 \text{ mA}$ 

AMBIENT TEMPERATURE		TEMP. COEFF.	KTY84/130				KTY84/150			
°C	°F	(%/K)	RESISTANCE (Ω)			TEMP. ERROR (K)	RESISTANCE (Ω)			TEMP. ERROR (K)
			MIN.	TYP.	MAX.		MIN.	TYP.	MAX.	
-40	-40	0.84	340	359	379	±6.48	332	359	386	±8.85
-30	-22	0.83	370	391	411	±6.36	362	391	419	±8.76
-20	-4	0.82	403	424	446	±6.26	394	424	455	±8.7
-10	14	0.80	437	460	483	±6.16	428	460	492	±8.65
0	32	0.79	474	498	522	±6.07	464	498	532	±8.61
10	50	0.77	514	538	563	±5.98	503	538	574	±8.58
20	68	0.75	555	581	607	±5.89	544	581	618	±8.55
25	77	0.74	577	603	629	±5.84	565	603	641	±8.54
30	86	0.73	599	626	652	±5.79	587	626	665	±8.53
40	104	0.71	645	672	700	±5.69	632	672	713	±8.5
50	122	0.70	694	722	750	±5.59	679	722	764	±8.46
60	140	0.68	744	773	801	±5.47	729	773	817	±8.42
70	158	0.66	797	826	855	±5.34	781	826	872	±8.37
80	176	0.64	852	882	912	±5.21	835	882	929	±8.31
90	194	0.63	910	940	970	±5.08	891	940	989	±8.25
100	212	0.61	970	1000	1030	±4.9	950	1000	1050	±8.17
110	230	0.60	1029	1062	1096	±5.31	1007	1062	1117	±8.66
120	248	0.58	1089	1127	1164	±5.73	1067	1127	1187	±9.17
130	266	0.57	1152	1194	1235	±6.17	1128	1194	1259	±9.69
140	284	0.55	1216	1262	1309	±6.63	1191	1262	1334	±10.24
150	302	0.54	1282	1334	1385	±7.1	1256	1334	1412	±10.8
160	320	0.53	1350	1407	1463	±7.59	1322	1407	1492	±11.37
170	338	0.52	1420	1482	1544	±8.1	1391	1482	1574	±11.96
180	356	0.51	1492	1560	1628	±8.62	1461	1560	1659	±12.58
190	374	0.49	1566	1640	1714	±9.15	1533	1640	1747	±13.2
200	392	0.48	1641	1722	1803	±9.71	1607	1722	1837	±13.85
210	410	0.47	1719	1807	1894	±10.28	1683	1807	1931	±14.51
220	428	0.46	1798	1893	1988	±10.87	1760	1893	2026	±15.19
230	446	0.45	1879	1982	2085	±11.47	1839	1982	2125	±15.88
240	464	0.44	1962	2073	2184	±12.09	1920	2073	2226	±16.59
250	482	0.44	2046	2166	2286	±12.73	2003	2166	2329	±17.32
260	500	0.42	2132	2261	2390	±13.44	2087	2261	2436	±18.15
270	518	0.41	2219	2357	2496	±14.44	2172	2357	2543	±19.36
280	536	0.38	2304	2452	2600	±15.94	2255	2452	2650	±21.21
290	554	0.34	2384	2542	2700	±18.26	2333	2542	2751	±24.14
300	572	0.29	2456	2624	2791	±22.12	2404	2624	2844	±29.05

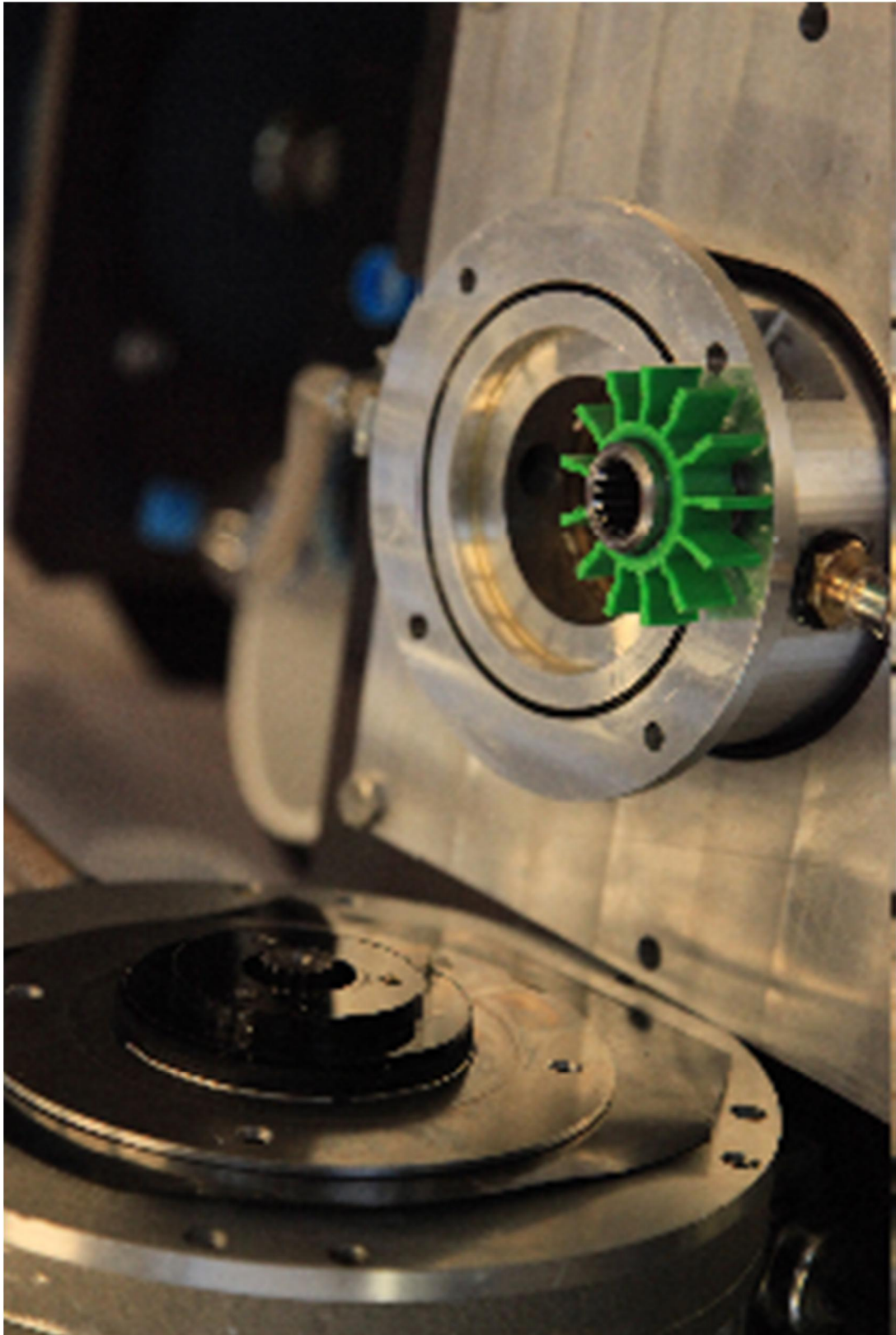
2003 Sep 15

4

Kuva 12. KTY84 -anturyyppien vastusarvotaulukko; suhteellinen mittaustarkkuus paranee kuumassa, mutta absoluuttinen mittaustarkkuus heikkenee

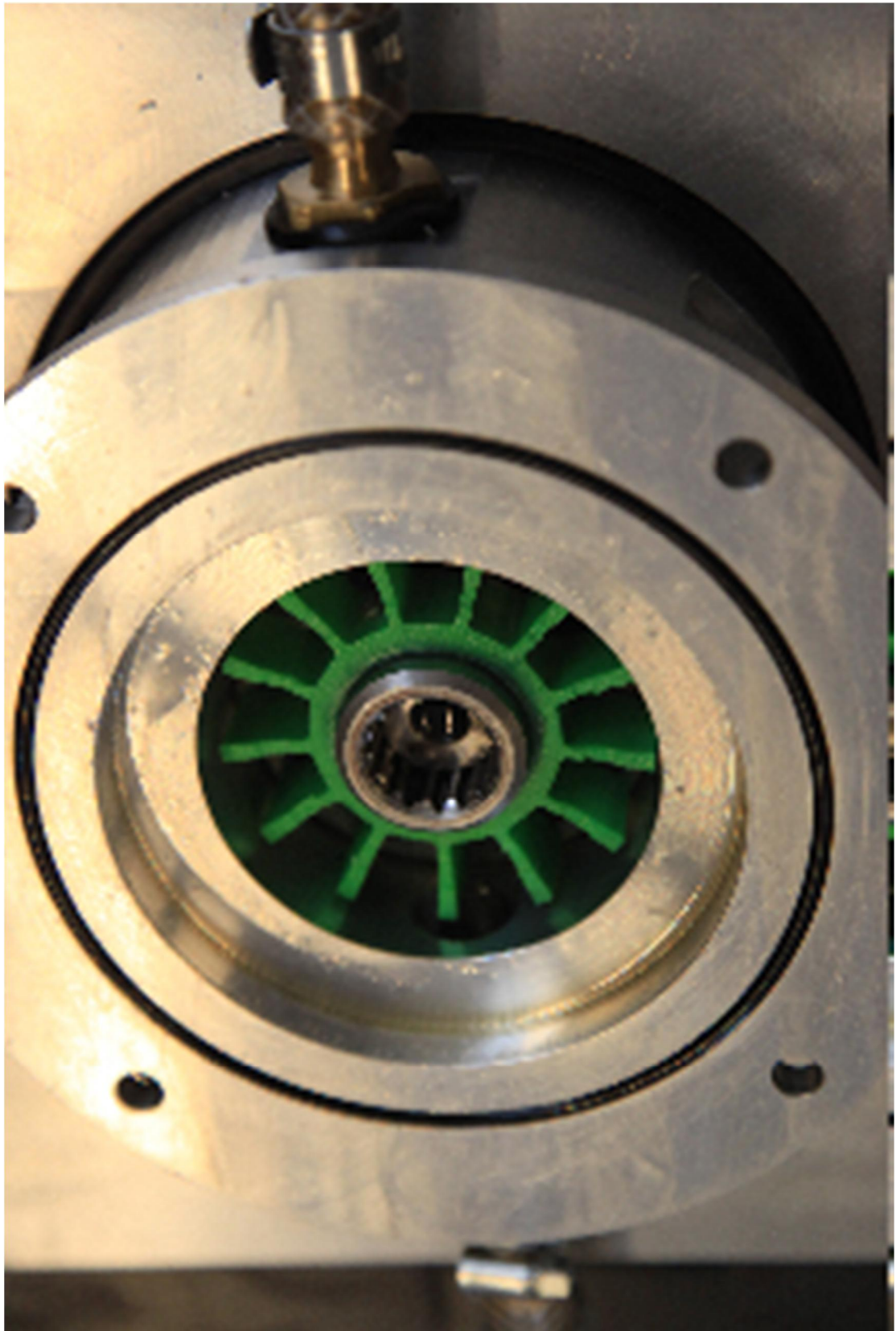


PM -moottorin pumppu



*Kuva 13. Keskipakoispumppu imee öljyn keskiöstä ja työntää sen ulkolaitaa vasten, jossa öljykanava sijaitsee*

PM -moottorin pumppu asennettuna



*Kuva 14. Keskiössä olevasta reiästä tuleva öljy jatkaa matkaansa kuvassa pumpun alla olevaan reikään*

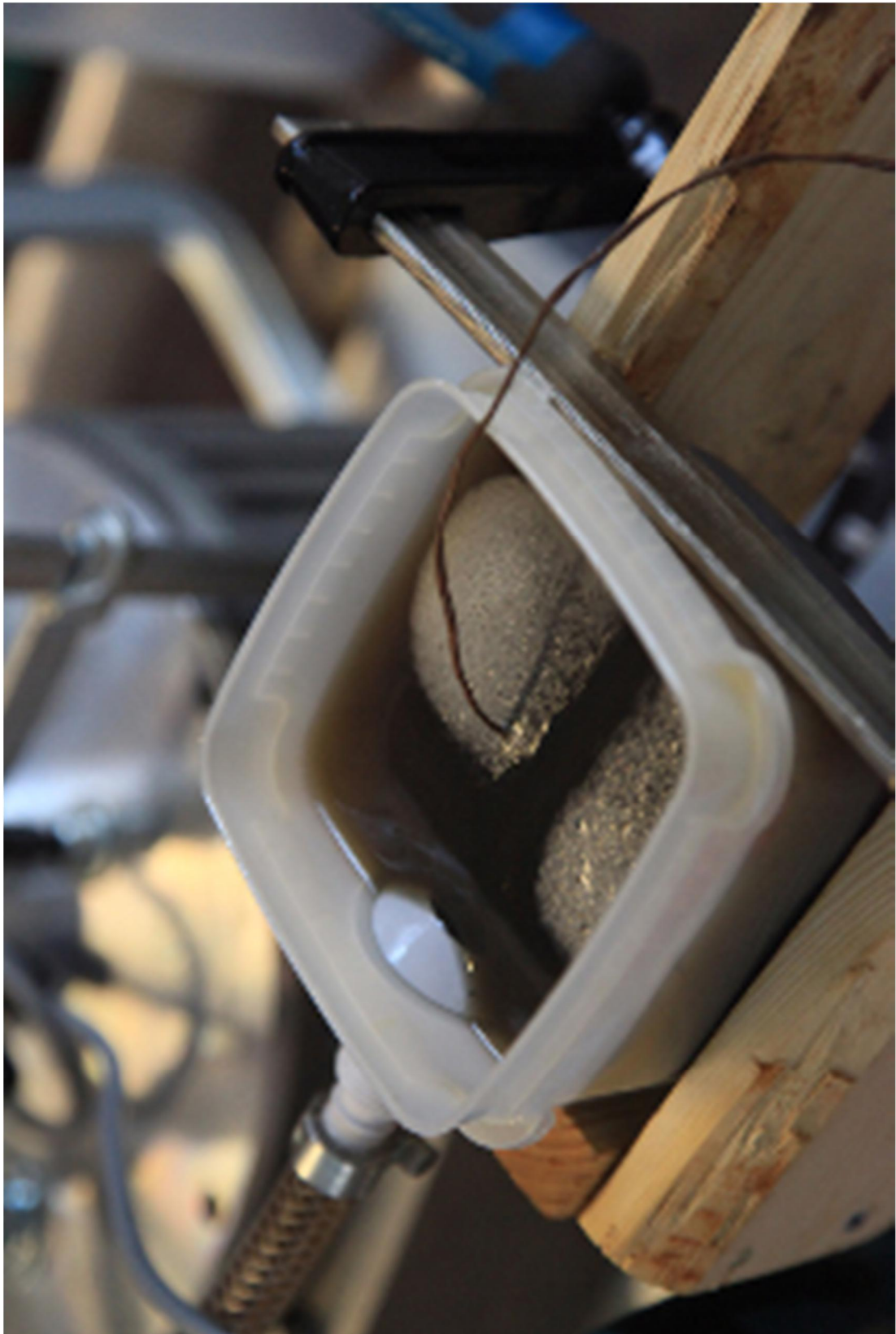


PM -moottorin vetolaite



*Kuva 15. Vetolaite; akselin toinen pää menee veneen pohjan läpi ja kiinnittyy moottoriin (oikealla), toinen pää potkuriin (alhaalla)*

## Öljykanavan ilmausastia



*Kuva 16. Öljykanaviston ilmaamiseen käytetty astia; moottorilta tulevan lämpimän öljyn mittanturi hyödyntää helppoa reittiä öljyn sekaan*



## Kuparinen lämmönlvovuttaja



*Kuva 17. Kuparinen öljyputki vedessä vastaa lämmönlvovutuskyvyltään suurelta osin vetolaitetta saman lämpöisessä vedessä*



## Kuormakone



*Kuva 18. Kuormakone kiinnittyy momenttianturin välityksellä mitattavaan moottoriin; se luo vastamomentin ja siirtää tuottamansa energian takaisin sähköverkkoon*

## Kuormakoneen ohjausyksikkö



Kuva 19. Kuormakoneen taajuusmuuttajayksikkö

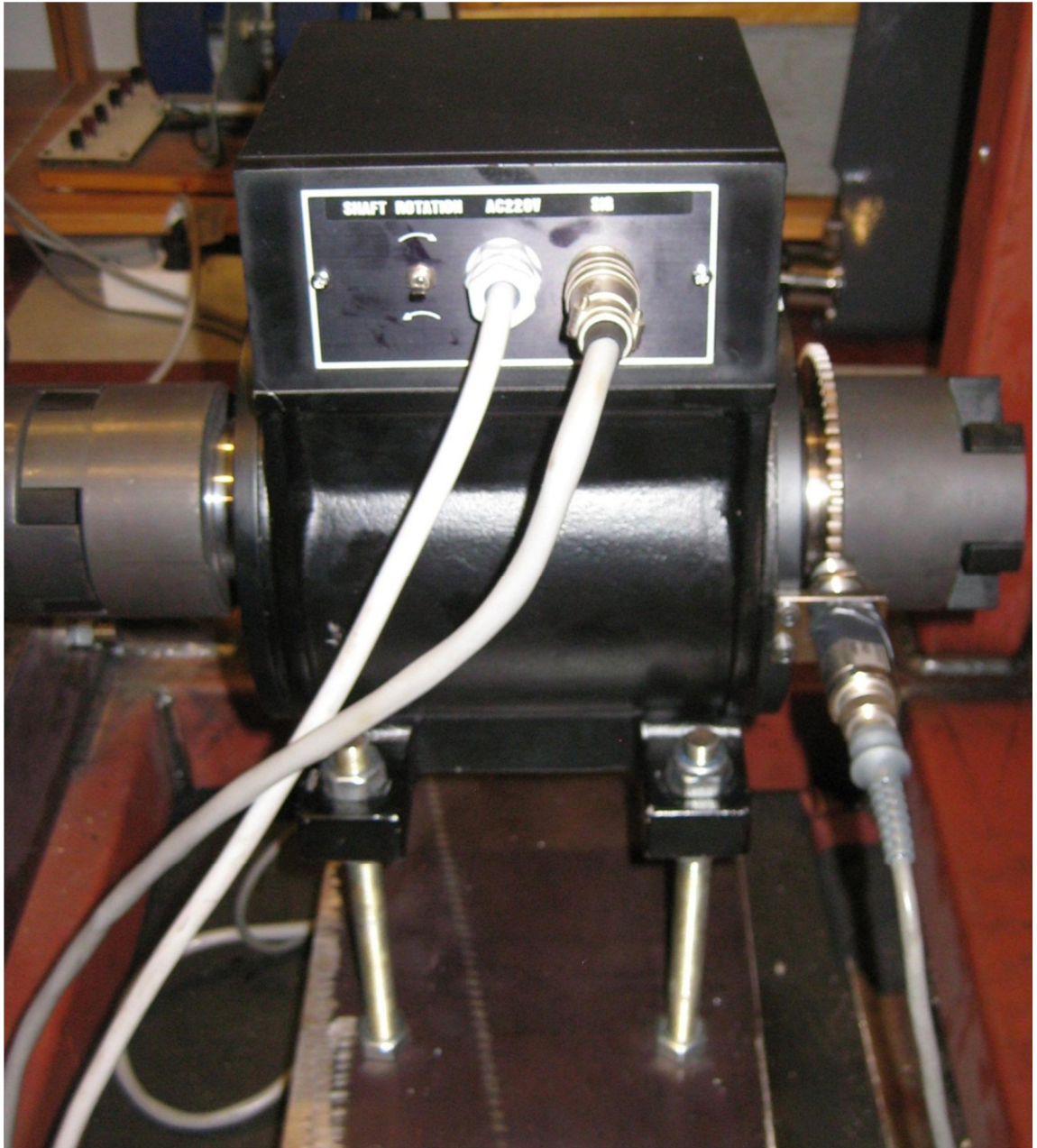


# Momenttianturin päätelaite



Kuva 20. Näyttöpäätteeltä luetaan akselilla vaikuttava momentti ja kuormakoneen kierrosluku, joita tarvitaan mm. hyötysuhteen määrittämiseen

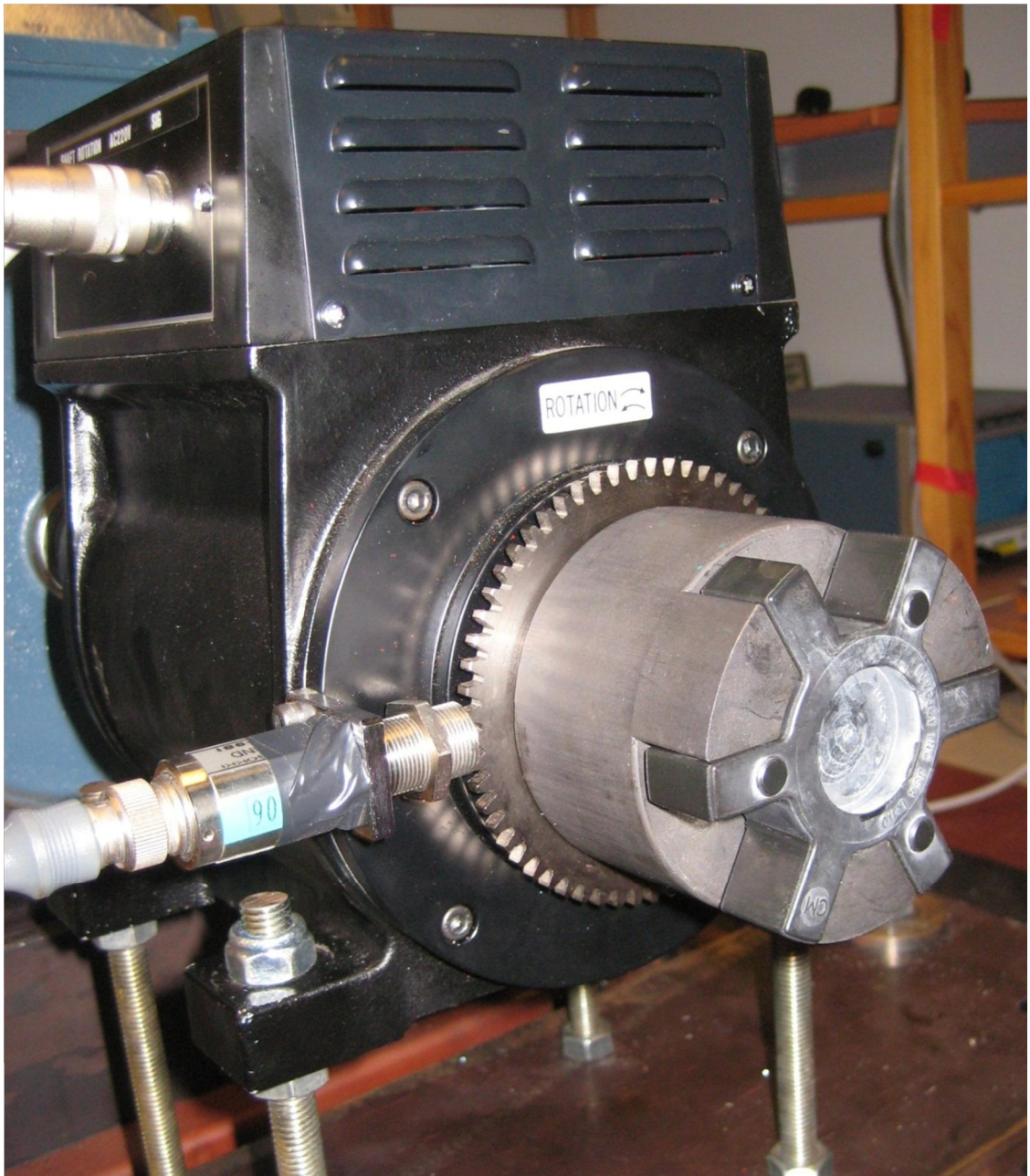
Momenttianturi sivusta



Kuva 21. Momenttianturi mittaa kierrosluvun sekä moottorin akselille tuottaman momentin



## Momenttianturi akselinpäästä



Kuva 22. Momenttianturin kiertosuunta katsotaan voimakoneen puolelta

## Momenttianturin kytkinadapteri



Kuva 23. Momenttianturin ja testattavan moottorin akselit eivät ole yhteensopivat, väliin tarvitaan adapteri

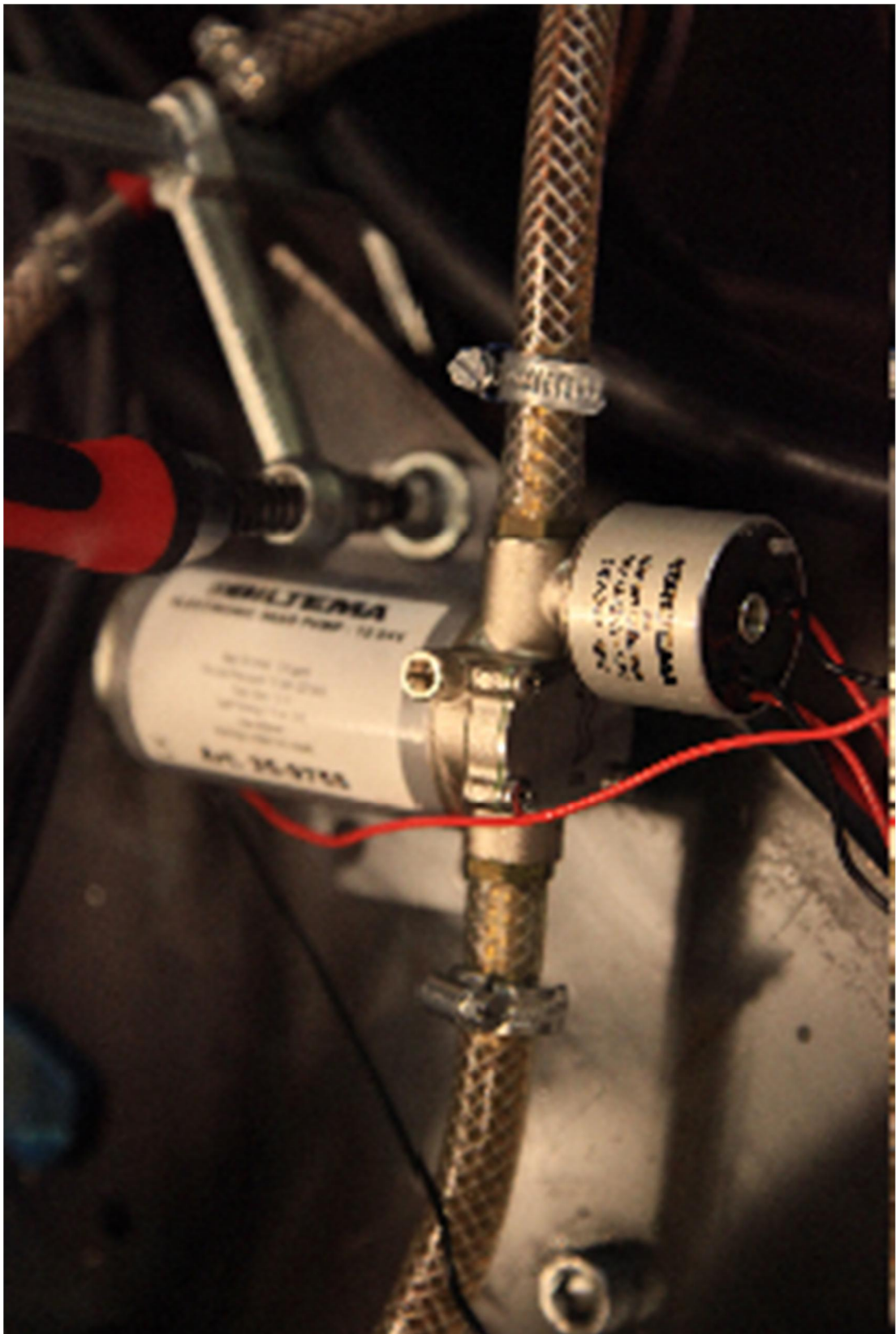


## Vedensekoittaja



Kuva 24. Jäähdytysvesiastiassa on testin aikana jäätä ja kupariputki luovuttaa noin 700 W:n teholla lämpöä; lämpötilan tasaamista varten tarvitaan vettä kierrättämään pumppu

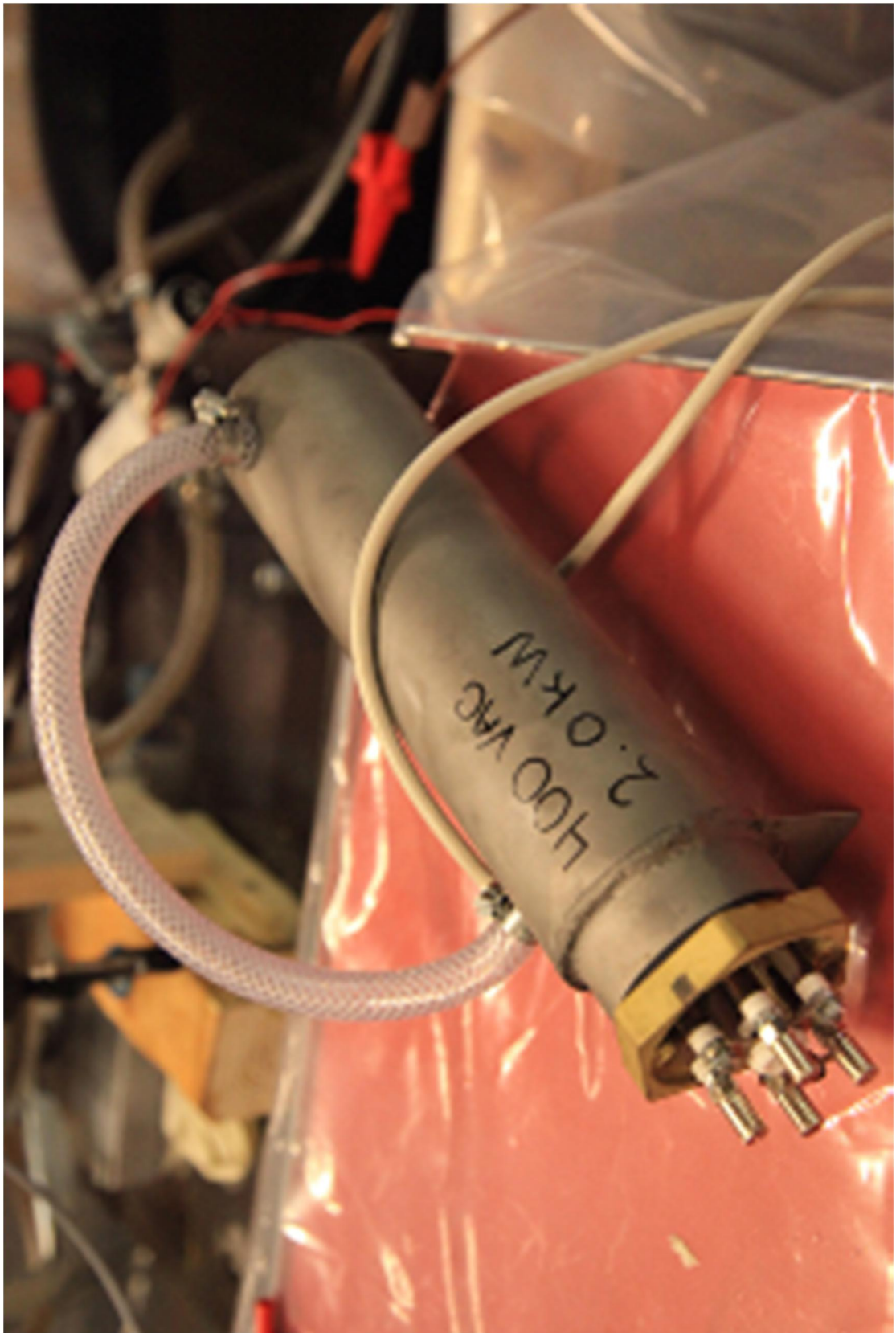
## Ulkoisen öljypumppu



*Kuva 25. Ulkoisella pumpulla testataan, paljonko moottorin oman pumpun toimintaa tarvitsee parantaa*



700 W:n lämpövastus



*Kuva 26. Lämpövastuksella varmistetaan kupariputken lämmönluovutuskyky laskujen mukaiseksi*

## Laippa-anturi



*Kuva 27. Moottorin sisäistä lämpötilan tasaantumista valvotaan moottorin sisään asennetulla laippa-anturilla, jolla myös varmistetaan, että käämit kykenevät siirtämään lämpöä koneen runkoon tehokkaasti*

## Mittaustulokset 1.4.2011

Taulukko 1. Mittaustulokset 1.4.2011; nmoot=1697rpm, npotk=875,6rpm ja Mpotk=40,2Nm

t [min]	Cakku [Ah]	U [V]	I [A]	Ts [°C]	Rmoot [Ω]	Tv [°C]	Töm [°C]	Töv [°C]	Tl [°C]
0	134,8	56	0	26	576	18	20,2	21,4	18,8
3	131,9	51	94	33	610	19,2			
6	127,3	51	94	38	650	19,7	22,8	24,5	24,2
9	122,6	51	94	40	682	19,1	24,8	26,9	27,6
12	118	51	94,5	39	710	18,9	26,9	29,3	30,5
15	113,3	50	94,5	40	736	19	29,1	31,6	33,9
18	108,6	50	94,5	40	760	19,3	31,2	33,7	37,4
21	103,8	50	94,5	41	781	19,2	33	35,6	39,5
24	99,1	50	95	41	801	19,8	34,7	37,3	41,1
27	94,2	50	94,5	42	819	19,8	36,2	38,9	43,7
30	89,7	50	95	42	834	19,8	37,4	40,2	44,8
33	85	50	95	42	849	20,2	38,6	41,6	46,9
36	80,1	50	95,5	42	861	20	39,5	42,8	48,1
39	75,4	50	95,5	43	873	20	40,3	43,8	48,8
42	70,6	50	95,5	43	883	20,7	41,2	44,7	51,6
45	65,8	50	95,5	43	892	20,6	41,6	45,4	52,8
48	61,1	50	96	43	900	20,4	42	46,1	53,8
51	56,3	50	96,5	43	908	20,8	42,4	46,7	54,2
54	51,5	50	96,5	43	914	20,7	42,7	47,2	54,5
57	46,7	49	96,5	43	919	20,7	42,9	47,6	54,8
60	41,9	50	97	43	924	20,9	43	48	55,2
63					-				55,3
66					827				57,3
69					806				57,3
72					793				57,5
75					784				56,9

## Tuloksista lasketut arvot 1.4.2011

Taulukko 2. Laskennalliset arvot 1.4.2011 saaduista mittaustuloksista

t [min]	Ppotk [W]	Pin [W]	Tmoot [°C]	hyötysuhde
0	0	0	19,6	
3	3686	4794	27,1	0,77
6	3686	4794	35,8	0,77
9	3686	4794	42,5	0,77
12	3686	4820	48,4	0,76
15	3686	4725	53,7	0,78
18	3686	4725	58,5	0,78
21	3686	4725	62,7	0,78
24	3686	4750	66,7	0,78
27	3686	4725	70,2	0,78
30	3686	4750	73,1	0,78
33	3686	4750	75,9	0,78
36	3686	4775	78,2	0,77
39	3686	4775	80,4	0,77
42	3686	4775	82,3	0,77
45	3686	4775	84,0	0,77
48	3686	4800	85,5	0,77
51	3686	4825	86,9	0,76
54	3686	4825	88,0	0,76
57	3686	4729	88,9	0,78
60	3686	4850	89,8	0,76
63			ei mitattu	
66			71,7	
69			67,6	
72			65,1	
75			63,3	

## Mittaustulokset 6.4.2011

Taulukko 3. Mittaustulokset 6.4.2011; nmoot=2195rpm, npotk=1133rpm ja Mpotk=46,2Nm

t [min]	Cakku [Ah]	U [V]	I [A]	Ts [°C]	Rmoot [Ω]	Tv [°C]	Töm [°C]	Töv [°C]	Tl [°C]
0	125,9	56	1	34	880	17,5	25,5	27,2	61,6
3	120	50	138	41	877	19,5	44,4	52,5	57,7
5	115,6	50	138,5	42	920	19,5	44,8	51	56,9
7	111	50	139	42	946	19,6	44,5	50,3	55,9
9	106,2	50	140	44	964	19,6	44,5	50,1	55,7
11	101,6	50	140	44	979	19,7	44,6	50,2	55,6
13	97	50	140,5	45	991	19,9	44,7	50,4	56,4
15	92,3	50	141	46	1001	20,5	44,9	50,8	56,7
17	87,4	50	141,5	47	1010	19,7	45,3	51,3	57,2
19	82,7	50	142	47	1019	19,7	45,8	51,9	57,5
21	77,8	50	142	47	1027	20	46,1	52,5	58,6
23	73,3	50	142,5	48	1034	20	46,5	52,9	59,3
25	68,6	49	142,5	48	1041	20,1	46,6	53,3	59,2
27	63,8	49	143	48	1048	20,2	47,3	53,8	59,9
29	59,1	49	143,5	49	1057	20,2	47,6	54,1	60,4
31	54,3	49	144	49	1063	19,8	47,9	54,4	60,8
33	49,5	49	144	49	1068	20	48,3	54,8	61,2

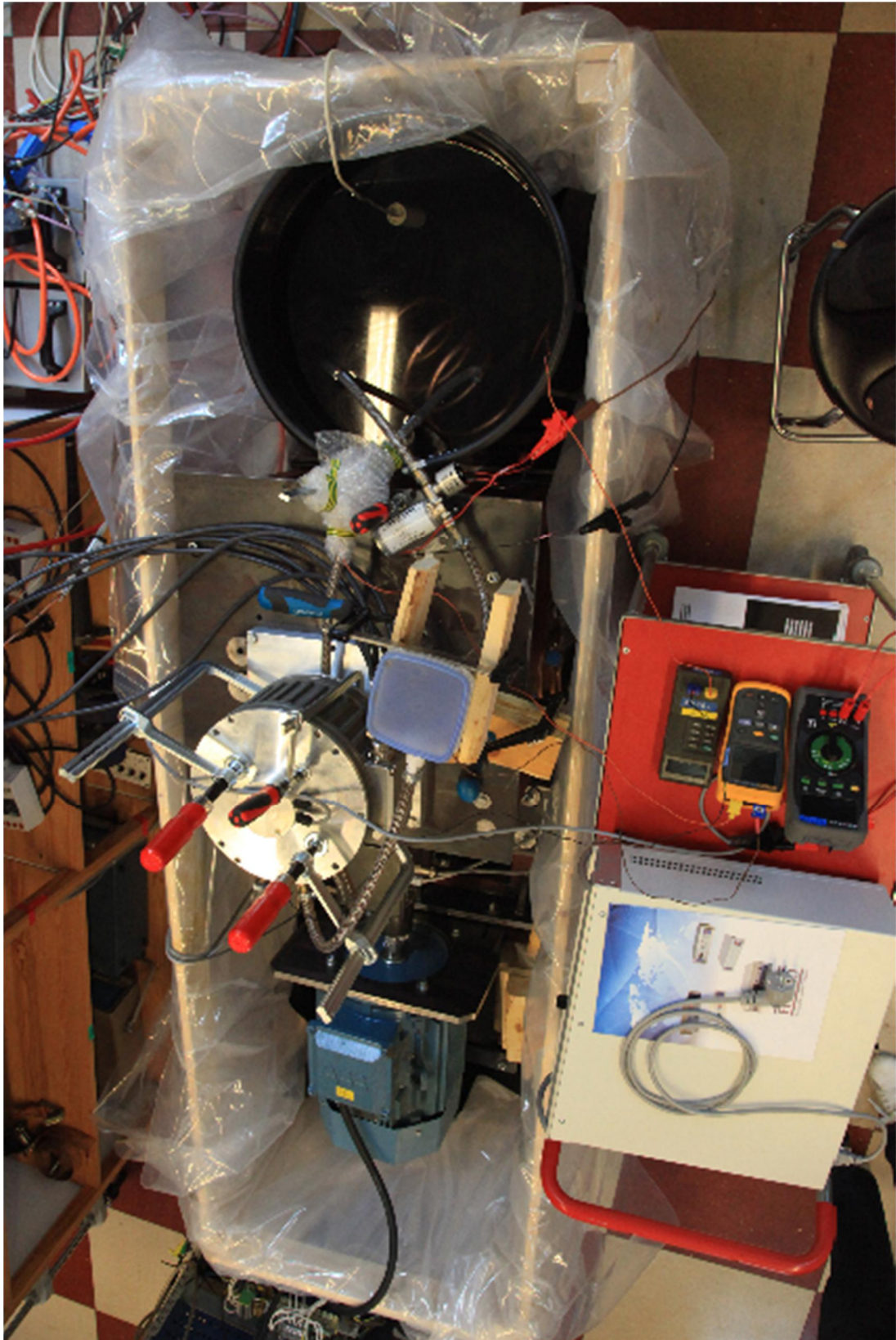
## Mittaustulokset 8.4.2011

Taulukko 4. Mittaustulokset 8.4.2011; nmoot=1696rpm, npotk=875,5rpm ja Mpotk=41,2Nm

t [min]	U [V]	I [A]	Ts [°C]	Rmoot [Ω]	Tv [°C]	Töm [°C]	Töv [°C]	Tl [°C]	Huomioitavaa
0	59	0	26	576	18,00	21,4	20,2	18,8	Ylösajo 4 minuutissa
5	58,7	81,2	36	632	19,20	21,5	25,2	25,5	
10	58,9	81,3	40	691	19,60	24,3	28,7	29,5	
15	58,3	81,1	40	738	19,60	17,4	31,9	35,2	
20	59,2	81,2	42	778	19,80	30,7	34,8	39,3	
25	59,2	81,2	42	812	19,50	33,6	37,4	43,7	
30	59,2	81,2	43	840	19,50	36,3	40	47	
35	58,7	81,2	44	865	19,60	38,3	42,2	49,8	
40	59,4	81,3	44	883	20,20	40	43,9	53	
45	58,4	81,2	44	900	20,00	41,3	45,5	53	
50	59,4	81,4	45	913	19,70	42,5	46,7	54,4	
55	58,5	81,4	45	924	19,50	43,4	47,8	55,7	Vetolaite vinkuu, moottori tärisee normaalia enemmän
60	58,4	81,4	45	933	19,60	44,1	48,5	56,4	
65	58,8	81,4	45	941	20,10	44,7	49,1	57,2	
70	58,4	81,5	46	947	19,80	45,2	49,7	57,5	
75	59,5	81,6	46	953	19,80	45,6	50,2	58	
80	59	81,6	46	956	19,90	45,8	50,4	58,6	
85	59,5	81,6	46	960	20,00	46,1	50,9	59,1	
90	58,5	81,6	46	963	20,20	46,1	51	58,6	Pumpun jännite 10 V
92				964					Kytкин pois paikoil- taan, koe seis



## Lopulliset testijärjestelyt



Kuva 28. Moottorit ja jäähdytysvesiastia valuma-altaassa, mittalaitteisto ja moottorinohjaimet teholähteeseen (ei kuvassa sen ulkopuolella)